

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

**Юго-Западного
государственного
университета**

Научный журнал

Том 24 № 2 / 2020

Proceedings

**of the Southwest
State University**

Scientific Journal

Vol. 24 № 2 / 2020



**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);

Кобелев Николай Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, 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);

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).

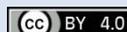
ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

Префикс DOI:10.21869

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

© Юго-Западный государственный университет, 2020



Материалы журнала доступны по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License

Типография:

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

Подписка и распространение:

журнал распространяется по подписке.

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

Периодичность: выходит ежеквартально

Свободная цена

Оригинал-макет подготовлен Е.В. Мельник

Подписано в печать 20.04.2020. Формат 60x84/8.

Бумага офсетная. Усл.печ.л. 19,6.

Тираж 1000 экз. Заказ 13.

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);

Nikolai S. Kobelev, 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);

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 №ФЦ77-42691 of 16.11.10).

ISSN 2223-1560 (Print)

ISSN 2686-6757 (Online)

DOI Prefix:10.21869

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

Printing office:

Printing Center

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

16+

Subscription and distribution:

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

Publication frequency: quarterly

Free price

Original lay-out design: E. Mel'nik

© Southwest State University, 2020



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

Singed to print 20.04.2020. Format 60x84/8.

Offset paper. Printer's sheets 19,6.

Circulation 1000 copies. Order 13.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Оригинальные статьи

Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием высокохромистой стали в керосине	8
<i>Агеева Е. В., Агеев Е. В., Сысоев А. А.</i>	
Влияние качества шихты на физико-механические и эксплуатационные свойства низколегированной стали 30ХГСА	17
<i>Сергеев Н. Н., Сергеев А. Н., Кутепов С. Н., Тихонова И. В., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., Клементьев Д. С.</i>	
К построению амплитудной зависимости внутреннего трения при колебаниях пористых металлических композитов	37
<i>Архипов И. К., Абрамова В. И., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., Кутепов С. Н., Калинин А. А.</i>	
Метод учёта влияния концевых шайб на обтекание крыла с изменяющимися по размаху профилями	49
<i>Галемин Е. К., Агеева Е. В.</i>	

СТРОИТЕЛЬСТВО

Оригинальные статьи

Комплексное восстановление работоспособного технического состояния несущей кирпичной кладки, имеющей физический износ.....	60
<i>Дубраков С. В., Дубракова К. О., Масалов А. В.</i>	
Оптимизация процессов кондиционирования воздуха здания с применением режима естественного охлаждения	73
<i>Жерлыкина М. Н., Щукина Т. В., Гурбангулыев А.</i>	

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Оригинальные статьи

Применение модели скоростной кластеризации пикселей в задачах предобработки изображений дистанционного зондирования Земли	90
<i>Ханыков И. Г.</i>	
Вариант разграничения доступа к информационным ресурсам на основе неявной аутентификации	108
<i>Марухленко А. Л., Плугатарев А. В., Таныгин М. О., Л. О. Марухленко, Шашков М. Ю.</i>	
Концептуальная структура системы управления клиентской базой страховой компании.....	122
<i>Смирнова А. С., Ханова А. А.</i>	
Цифровые водяные знаки с адаптивной шириной информационного кольца в задаче скрытой передачи управляющего сигнала в многоагентной робототехнической системе.....	136
<i>Шумская О. О., Исхакова А. О.</i>	
Разработка авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок	153
<i>Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Юшин В. В., Попов В. М.</i>	

CONTENT

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Original articles

Dimensional Analysis of Powders Obtained by Electroerosive Dispersion of High-Chromium Steel in Kerosene	8
<i>Ageeva E. V., Ageev E. V., Sysoev A. A.</i>	
Influence of Charge Quality on Physical, Mechanical and Operational Properties of Low-Alloy Steel 30KHGSA	17
<i>Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'yev D. S.</i>	
To the Construction of the Amplitude Dependence of Internal Friction with Vibrations of Porous Metal Composites	37
<i>Arkhipov I. C., Abramova V. I., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Kutepov S. N., Kalinin A. A.</i>	
Method for Accounting the Effect of End Washers on the Flow Around the Wing with Spanwise Profiles	49
<i>Galemin E. K., Ageeva E. V.</i>	

CONSTRUCTION

Original articles

Comprehensive Restoration of an Efficient Technical Condition of the Bearing Brickwork, Having Physical Wear	60
<i>Dubrakov S. V., Dubrakova K. O., Masalov A. V.</i>	
Optimization of Building Air Conditioning Processes Applying Free Cooling.....	73
<i>Zherlykina M. N., Shchukina T. V., Gurbangulyev A.</i>	

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Original articles

Application of the Pixel Velocity Clustering Model in the Tasks of Preprocessing Images of Earth Remote Sensing	90
<i>Khanykov I. G.</i>	
Option of Control of Access to Information Resources Based on Implicit Authentication.....	108
<i>Marukhlenko A. L., Plugatarev A. V., Tanygin M. O., Marukhlenko L. O., Shashkov M. Yu.</i>	
Conceptual Structure of the Insurance Company's Customer Database Management System	122
<i>Smirnova A. S., Khanova A. A.</i>	
Digital Watermarks with Adaptive Information Ring Width in the Issue of Hidden Transmission of a Control Signal in the Multi-Target Robotic System	136
<i>Shumskaya O. O., Iskhakova A. O.</i>	
Development of the Authors' Method for Arranging Routes for Elimination of Unauthorized Dumps	153
<i>Kirilchuk I. O., Iordanova A. V., Yushin V. V., Popov V. M.</i>	

Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием высокохромистой стали в керосине

Е. В. Агеева ¹ ✉, Е. В. Агеев ¹, А. А. Сысоев ¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Целью работы являлась оценка размерных характеристик порошков, полученных электродиспергированием высокохромистой коррозионностойкой стали в керосине осветительном.

Методы. При постановке экспериментов для электроэрозионного диспергирования были выбраны отходы высокохромистой коррозионностойкой стали X17. Оборудование для диспергирования – экспериментальная установка (Патент РФ №2449859). В качестве рабочей жидкости применялся керосин осветительный. С целью стабилизации процесса режимы диспергирования подобраны экспериментальным опытным путем и были следующими: напряжение 100 В; частота следования импульсов 120 Гц; емкость 48 мкФ. Гранулометрический состав порошков исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoТес».

Результаты. На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на изучение гранулометрического состава электроэрозионных порошков, полученных из отходов высокохромистой коррозионностойкой стали X17 в керосине осветительном на экспериментальной установке (Патент РФ №2449859) при частоте следования импульсов 120 Гц, напряжении 100 В и емкости разрядных конденсаторов 48 мкФ, установлено, что средний размер частиц составляет 28,66 мкм и 95% от общего объема частиц в порошке имеют размер меньший или равный 57,36 мкм.

Заключение. Проведенные исследования позволят посредством применения прогрессивной, экологически чистой, малотоннажной и безотходной технологии электроэрозионного диспергирования получать новые порошковые материалы из отходов высокохромистой коррозионностойкой стали X17 в керосине осветительном с гарантированным гранулометрическим составом.

Ключевые слова: отходы высокохромистой стали; электроэрозионное диспергирование; порошок; гранулометрический состав.

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

© Агеева Е. В., Агеев Е. В., Сысоев А. А., 2020

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-90053.

Для цитирования: Агеева Е. В., Агеев Е. В., Сысоев А. А. Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием высокохромистой стали в керосине // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 8-16. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-8-16>.

Поступила в редакцию 29.01.2020

Подписана в печать 17.02.2020

Опубликована 20.04.2020

Dimensional Analysis of Powders Obtained by Electroerosive Dispersion of High-Chromium Steel in Kerosene

Ekaterina V. Ageeva¹ ✉, Evgeny V. Ageev¹, Arthur A. Sysoev¹

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research was to evaluate the dimensional characteristics of powders obtained by electrodispersion of high-chromium corrosion-resistant steel in lighting kerosene.

Methods. When setting up experiments for electroerosive dispersion, wastes of high-chromium corrosion-resistant steel X17 were selected. Dispersing equipment - experimental setup (RF Patent No. 2449859). Lighting kerosene was used as a working fluid. In order to stabilize the process, the dispersion modes were selected experimentally and were as follows: voltage 100 V; pulse repetition rate 120 Hz; capacity 48 μ F. The granulometric composition of the powders was studied using a laser particle size analyzer "Analysette 22 NanoTec".

Results. It has been found that the average particle size is 28.66 μ m and 95% of the total volume of particles in the powder have a size less than or equal to 57.36 μ m. ,based on the conducted experimental studies aimed at studying the particle size distribution of electroerosive powders obtained from wastes of high-chromium corrosion-resistant steel X17 in lighting kerosene on an experimental setup (RF Patent No. 2449859) at a pulse repetition rate of 120 Hz, a voltage of 100 V and the capacity of the discharge capacitors is 48 μ F.

Conclusion. The conducted research will allow us to obtain new powder materials from wastes of high-chromium corrosion-resistant steel X17 in lighting kerosene with a guaranteed particle size distribution, through the use of progressive, environmentally friendly, low-tonnage and waste-free technology of electroerosive dispersion.

Keywords: high-chromium steel waste; electroerosive dispersion; powder; granulometric composition.

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

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR in the framework of scientific project No. 19-33-90053.

For citation: Ageeva E. V., Ageev E. V., Sysoev A. A. Dimensional Analysis of Powders Obtained by Electroerosive Dispersion of High-Chromium Steel in Kerosene // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 8-16 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-8-16>.

Received 29.01.2020

Accepted 17.02.2020

Published 20.04.2020

Введение

Высокохромистые коррозионностойкие стали эффективно используются во многих областях промышленности. В настоящее время одной из основных проблем применения этих сталей является наличие в них значительного количества дорогостоящего хрома [1-6]. Данный недостаток может быть решен повторным их использованием после измельчения отходов. Существующие способы измельчения подобных сплавов являются экологически грязными, энергоемкими и крупнотоннажными. Одним из перспективных и промышленно неприменяемых способов измельчения любого электропроводного материала является электродиспергирование [7-12].

Для разработки технологий повторного использования порошков, полученных электродиспергированием коррозионностойкой стали и оценки возможности их использования в промышленности требуется выполнение экспериментальных исследований.

Целью работы являлась оценка размерных характеристик порошков, полученных электродиспергированием высокохромистой коррозионностойкой стали в керосине осветительном.

Материалы и методы

При постановке экспериментов для электроэрозийного диспергирования были выбраны отходы высокохромистой

коррозионностойкой стали X17. Оборудование для диспергирования – экспериментальная установка (Патент РФ №2449859). В качестве рабочей жидкости применялся керосин осветительный. С целью стабилизации процесса режимы диспергирования подобраны экспериментальным опытным путем и были следующими: напряжение 100 В; частота следования импульсов 120 Гц; емкость 48 мкФ.

Размерные характеристики порошков исследовали на лазерном анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» (рис. 1).



Рис. 1. Лазерный дифракционный анализатор размера частиц Analysette 22 NanoTec

Fig. 1. Laser diffraction particle size analyzer Analysette 22 Nano

На рис. 2 представлена блок-схема исследования размерных характеристик порошков.

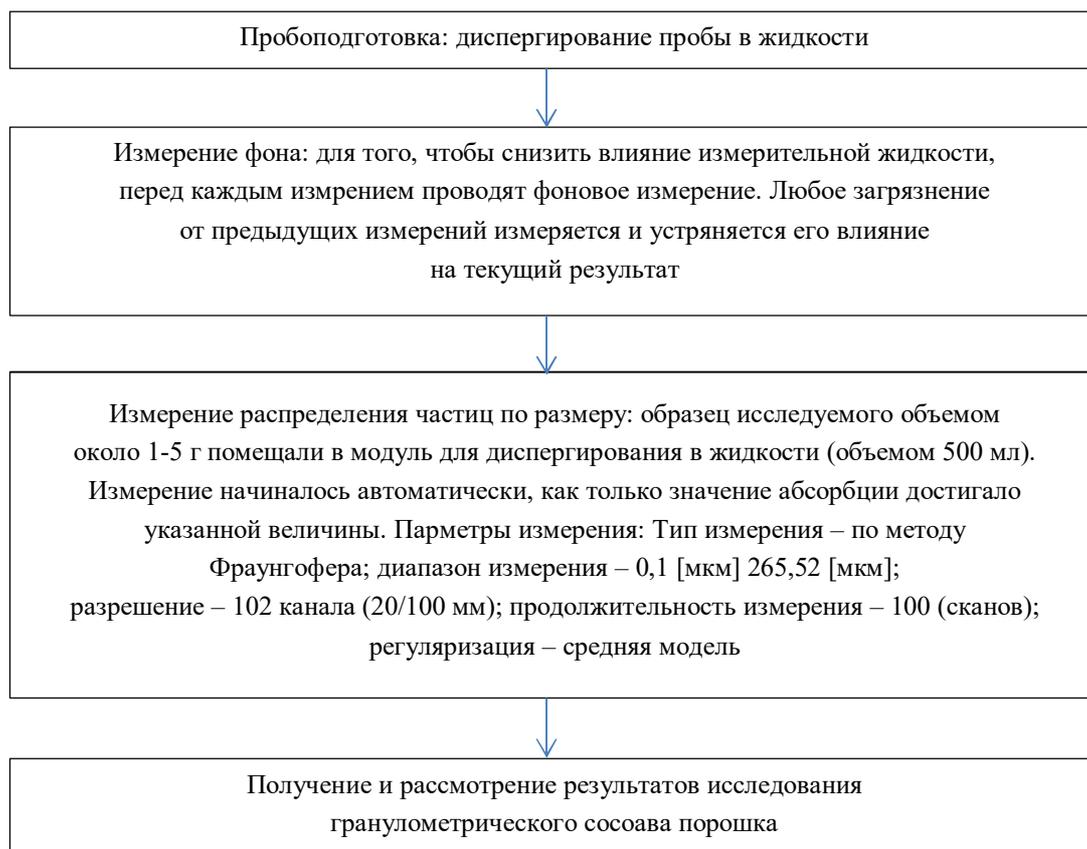


Рис. 2. Блок-схема исследования размерных характеристик порошков на лазерном дифракционном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec

Fig. 2. Block diagram for studying the size characteristics of powders using the Analysette 22 NanoTec laser diffraction particle size analyzer

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования размерных характеристик порошков, полученных электродиспергированием высокохромистой коррозионностойкой стали X17 в керосине осветительном, представлены на рис. 3 и в табл. 1.

На рис. 3 представлены интегральная кривая и гистограмма: каждая точка на интегральной кривой $Q3(x)=f(\mu\text{m})$ показывает, сколько процентов частиц имеет размер меньше или равный данному; каждая точка на гистограмме

$q3(x)=f(\mu\text{m})$ показывает количество частиц в процентах с данным размером.

В табл. 1 приведены результаты исследования распределения по размерам микрочастиц.

D50 (50% of particles) – 26,99 мкм, то есть частиц, размером меньше или равно 26,99 мкм в порошке содержится 50,0% от общего объема.

При помощи лазерного дифракционного анализатора размера частиц Analysette 22 NanoTec установлено, что средний составляет 28,66 мкм, арифметическое значение – 28,655 мкм.

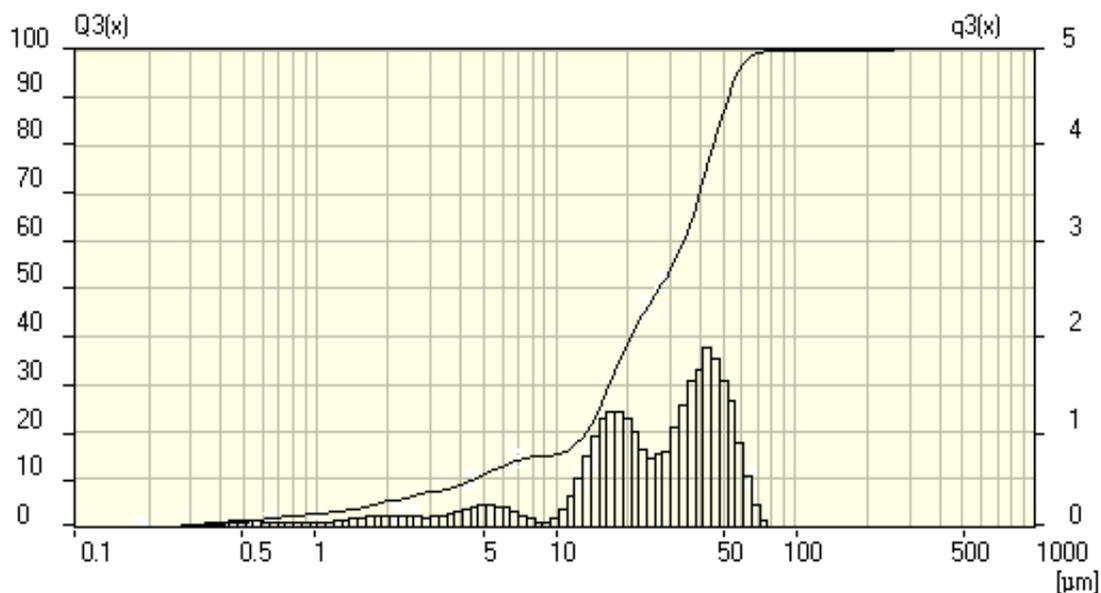


Рис. 3. Распределение по размерам микрочастиц порошка

Fig. 3. Size distribution of powder microparticles

Таблица 1. Результаты исследования размера частиц

Table 1. Results of the particle size study

Параметр	Значение, мкм
D10 (10% of particles)	4,56
D20 (20% of particles)	13,51
D30 (30% of particles)	16,93
D40 (40% of particles)	20,52
D50 (50% of particles)	26,99
D60 (60% of particles)	34,31
D70 (70% of particles)	39,96
D80 (80% of particles)	45,41
D90 (90% of particles)	52,23
D95 (95% of particles)	57,36
d[4,3] Объемный средний диаметр	28,66
d[3,2] Средний диаметр по площади поверхности	7,86
d[3,0] Средний диаметр по отношению к объему	1,047
d[2,0] Средний диаметр по отношению к площади	0,64
d[1,0] Средний диаметр по отношению к длине	0,45

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований, направленных на изучение гранулометрического состава электроэрозионных порошков, полученных из отходов высокохромистой коррозионностойкой стали X17 в керосине осветительном на экспериментальной установке (Патент РФ №2449859) при частоте следования импульсов 120 Гц, напряжении 100 В и емкости разрядных конденсаторов 48 мкФ, установлено, что средний размер частиц

составляет 28,66 мкм и 95% от общего объема частиц в порошке имеют размер меньше или равный 57,36 мкм.

Проведенные исследования позволяют посредством применения прогрессивной, экологически чистой, малотоннажной и безотходной технологии электроэрозионного диспергирования получать новые порошковые материалы из отходов высокохромистой коррозионностойкой стали X17 в керосине осветительном с гарантированным гранулометрическим составом.

Список литературы

1. Попов В.С., Скоробогатых В.Н., Щенкова И.А. Исследование влияния режимов термической обработки на свойства высокохромистых сталей для энергетических установок // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 3. С. 41-47.
2. Гладштейн В.И., Пчелинцев А.В. Исследование жаропрочности и трещиностойкости металла корпуса стопорного клапана из высокохромистой стали 15X11МФБЛ после длительной эксплуатации // Электрические станции. 2005. № 10. С. 78-80.
3. Людвиницкий С.С. Предупреждение образования трещин на деталях паровых турбин из высокохромистых сталей при ручной аргодуговой сварке // Энергетик. 2007. № 2. С. 22-23.
4. Матюшева Е.Л., Теплухина И.В. Разработка паротурбинных высокохромистых сталей нового поколения с повышенной стабильностью характеристик длительной прочности // Вопросы материаловедения. 2010. № 3 (63). С. 5-15
5. Фазовые превращения в коррозионно-стойкой высокохромистой азотсодержащей стали / М.В. Костина, С.О. Мурадян, М.С. Хадыев, А.А. Корнеев // Металлы. 2011. № 5. С. 33.
6. Атрошенко С.А., Королев И.А. Оценка качества высокохромистых инструментальных сталей // Научное обозрение. 2012. № 1. С. 63-70.
7. Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием сплава ВНЖ / Е.В. Агеева, В.Л. Селютин, Г.Р. Латыпова, А.С. Осьмина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8. № 2 (27). С. 20-31.

8. Рентгеноструктурный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием сплава ВНЖ / Е.В. Агеева, В.Л. Селютин, А.А. Горохов, В.В. Куц // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 3 (24). С. 60-68.

9. Фазовый состав частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутиловом спирте / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, С.С. Гулидин, Е.В. Агеев, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 20-25.

10. Ageev E.V., Latypov R.A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. Т. 55. No. 6. С. 577-580.

11. Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy / R.A. Latypov, G.R. Latypova, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian metallurgy (Metally). 2017. Т. 2017. № 12. С. 1083-1085.

12. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes / R.A. Latypov, G.R. Latypova, E.V. Ageev, A.Y. Altukhov, E.V. Ageeva // Russian metallurgy (Metally). 2018. Т. 2018. № 6. С. 573-575.

References

1. Popov V. S., Skorobogatykh V. N., Schenkova I. A. Issledovanie vliyaniya rezhimov termicheskoi obrabotki na svoistva vysokokhromistykh stali dlya energeticheskikh ustanovok [Investigation of the influence of heat treatment regimes on the properties of high-chromium steels for power plants]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2008, no. 3, pp. 41-47 (In Russ.).

2. Gladstein V. I., Pchelintsev A.V. Issledovanie zharoprochnosti i treshchinostoikosti metalla korpusa stopornogo klapana iz vysokokhromistoi stali 15Kh11MFBL posle dlitel'noi ekspluatatsii [Study of heat resistance and crack resistance of the metal body of the stop valve made of high-chromium steel 15X11MFBL after long-term operation]. *Elektricheskie stantsii = Electric stations*, 2005, no. 10, pp. 78-80 (In Russ.).

3. Ludvinitzky S. S. Preduprezhdenie obrazovaniya treshchin na detalyakh parovykh turbin iz vysokokhromistykh stali pri ruchnoi argonodugovoi svarke [Prevention of crack formation on details of steam turbines made of high-chromium steels during manual argon-arc welding]. *Energetik = Energetick*, 2007, no. 2, pp. 22-23 (In Russ.).

4. Matyusheva E. L., Teplukhina I. V. Razrabotka paroturbinykh vysokokhromistykh stali novogo pokoleniya s povyshennoi stabil'nost'yu kharakteristik dlitel'noi prochnos-

ti [Development of steam turbine high-chromium steels of a new generation with increased stability of long-term strength characteristics]. *Voprosy materialovedeniya = Questions of materials science*, 2010, no. 3 (63), pp. 5-15 (In Russ.).

5. Kostina M. V., Muradyan S. O., Khadiev M. S., Korneev A. A. Fazovye prevrashcheniya v korrozionno-stoikoi vysokokhromistoi azotsoderzhashchei stali [Phase transformations in corrosion-resistant high-chromium nitrogen-containing steel]. *Metally = Metals*, 2011, no. 5, pp. 33 (In Russ.).

6. Atroshenko S. A., Korolev I. A. Otsenka kachestva vysokokhromistyykh instrumental'nykh staley [Evaluation of the quality of high-chromium tool steels]. *Nauchnoe obozrenie = Scientific Review*, 2012, no. 1, pp. 63-70 (In Russ.).

7. Ageev E. V., Selyutin V. L., Latypova G. R., Osminina A. S. Razmernyi analiz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem splava VNZh [Dimensional analysis of the powders produced by electroerosion dispersion of alloy residence permit]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 20-31 (In Russ.).

8. Ageeva E. V., Selyutin V. L., Gorokhov A. A., Kuts V. V. Rentgenostrukturnyi analiz poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergirovaniem splava VNZh [X-ray Diffraction analysis of powders obtained by electroerosive dispersion of the alloy VNZH]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, no. 3 (24), pp. 60-68 (In Russ.).

9. Ageeva E. V., Altukhov A. Yu., Gulidin S. S., Ageev E. V., Gorokhov A. A. Fazovyi sostav chastits poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergirovaniem splava vk8 v butilovom spirte [Phase composition of powder particles obtained by electroerosive dispersion of VK8 alloy in butyl alcohol]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25 (In Russ.).

10. Ageev E. V., Latypov R. A. Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2014, vol. 55, no. 6, pp. 577-580.

11. Latypov R. A., Latypova G. R., Ageev E. V., Altukhov A. Y., Ageeva E. V. Elemental composition of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy. *Russian metallurgy (Metallically)*, 2017, vol. 2017, no. 12, pp. 1083-1085.

12. Latypov R. A., Latypova G. R., Ageev E. V., Altukhov A. Y., Ageeva E. V. Properties of the coatings fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes. *Russian metallurgy (Metallically)*, 2018, vol. 2018, no. 6, pp. 573-575.

Информация об авторах / Information about the Authors

Агеева Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Ekaterina V. Ageeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials and Transport Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

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

Сысоев Артур Алексеевич, аспирант кафедры технологии материалов и транспорта ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: evoking09@rambler.ru

Arthur A. Sysoev, Post-Graduate Student of the Department of Materials Technology and Transport, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: evoking09@rambler.ru

Влияние качества шихты на физико-механические и эксплуатационные свойства низколегированной стали 30ХГСА

Н. Н. Сергеев¹, А. Н. Сергеев¹, С. Н. Кутепов¹, И. В. Тихонова²,
А. Е. Гвоздев¹, Е. В. Агеев³ ✉, Д. С. Клементьев¹

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
пр. Ленина 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель работы – исследование влияния качества первородной шихты на комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционной низколегированной стали 30ХГСА.

Методы. В качестве объекта исследования был выбран типичный представитель конструкционных низколегированных сталей – сталь 30ХГСА, выплавленная с использованием металлургических окатышей губчатого железа, обычного металлического лома и заготовки, полученные методом кипящего шлакового слоя. В соответствии с поставленными задачами исследования сталь 30ХГСА различных плавок, полученная на различной шихте, имела одинаковые условия выплавки, вакуумирования, раскисления, разливки и кристаллизации. Температура разливки составила 1600...1620 °С, после вакуумной обработки – 1530...1560 °С. Длительность вакуумирования – 5 минут. Разливку плавок осуществляли в чугунные изложницы сифоном в течение 4...5 минут. Раскисление проводили в ковше алюминием в количестве 4...4,5 кг/плавку. После затвердевания слитки охлаждали в специальных колодцах. Слитки разрезали на 3 части: головную, среднюю и донную (размером 600×600 мм). Среднюю часть затем в горячую ковали и катали до прутка Ø30 мм. Длина прутка составляла 2...3,4 м. После горячей деформации прутки охлаждали на воздухе.

Результаты. Проведены механические испытания. Выполнена статистическая обработка экспериментальных результатов. Выявлены закономерности изменения характеристик механических свойств: временного сопротивления, предела текучести, относительного сужения площади поперечного сечения образца, относительного удлинения начальной рабочей длины, ударной вязкости (σ_B , $\sigma_{0,2}$, ψ , δ , a_K).

Заключение. Установлено, что с возрастанием температуры механические свойства стали 30ХГСА, выплавленной на различных шихтах, уменьшаются. Порог хладноломкости стали 30ХГСА ниже у более чистых плавок на губчатом железе и полупродукте КШС, величина ударной вязкости при низких температурах выше, чем в плавке на обычной металлургической шихте. Заметное разупрочнение начинается с температуры отпуска равной 300 °С. Температура максимальной отпускной хрупкости для стали 30ХГСА, выплавленной на обычной металлургической шихте, составляет 550 °С. Показано, что сталь 30ХГСА, выплавленная на чистой первородной шихте (губчатое железо), имеет меньшую склонность к отпускной хрупкости, чем сталь, выплавленная на обычной шихте. Величина ударной вязкости стали этой плавки выше, чем стали обычной выплавки во всем интервале температур отпуска.

Ключевые слова: хладноломкость; поверхностно-активные примеси; граница зерен; первородная шихта; ударная вязкость; отпуск.

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

Финансирование. Работа выполнена по проекту №11.6682.2017/8.9.

Для цитирования: Влияние качества шихты на физико-механические и эксплуатационные свойства низколегированной стали 30ХГСА / Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутепов, И. В. Тихонова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, Д. С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 17-36. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-17-36>.

Поступила в редакцию 10.02.2020

Подписана в печать 26.03.2020

Опубликована 20.04.2020

Influence of Charge Quality on Physical, Mechanical and Operational Properties of Low-Alloy Steel 30KHGSA

Nikolay N. Sergeev¹, Alexander N. Sergeev¹, Sergei N. Kutepov¹,
Irina V. Tikhonova², Alexander E. Gvozdev¹,
Evgeny V. Ageev³ ✉, Denis S. Klement'yev¹

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

² Tula State University
92 Lenin str., Tula 300012, Russian Federation

³ Southwest State University,
50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to study the influence of the quality of the original charge on the complex of physical, mechanical and operational properties of structural low-alloy steel 30HGSA.

Methods. As an object of research, a typical representative of low-alloy structural steels has been chosen - steel 30HGSA, smelted using metallized sponge iron pellets, ordinary scrap metal and billets obtained by the method of a boiling slag layer. In accordance with the set objectives of the study, steel 30HGSA of various melts, obtained with different charge, had the same conditions for melting, evacuation, deoxidation, casting and crystallization. The casting temperature was 1600... 1620 °C and the post-vacuum treatment temperature was 1530... 1560 °C. Duration of evacuation - 5 minutes. Casting of melts was carried out into cast iron molds with a siphon for 4 ... 5 minutes. Deoxidation was carried out in a ladle with aluminum in the amount of 4 ... 4.5 kg / melt. After solidification, the ingots were cooled in special wells. The ingots were cut into 3 parts: head, middle and bottom (600 × 600 mm). The middle part was then hot forged and rolled to a Ø30 mm bar. The length of the rod was 2 ... 3.4 m. After hot deformation, the rods were cooled in air.

Results. Mechanical tests have been carried out. Statistical processing of experimental results has been performed. Regularities of changes in the characteristics of mechanical properties have been revealed: tensile strength, creep strength, relative narrowing of the cross-sectional area of the sample, relative elongation of the initial working length, impact strength (σ_B , $\sigma_{0.2}$, ψ , δ , aH).

Conclusion. It has been found that with an increase in temperature, the mechanical properties of steel 30HGSA, smelted on various charges, decrease. It has been established that the cold brittleness threshold of 30HGSA steel is lower for purer melts on spongy iron and intermediate product KShS, the value of impact toughness at low temperatures is higher

than in melting on a conventional metallized charge. Noticeable softening begins at a tempering temperature of 300 °C. The temperature of the maximum tempering brittleness for steel 30HGSA, melted on a conventional metallized charge, is 550 °C. It is shown that steel 30HGSA smelted with a pure original charge (spongy iron) has a lower tendency to temper brittleness than steel smelted with a conventional charge. The value of the impact toughness of the steel of this melt is higher than that of the steel of conventional melting over the entire tempering temperature range.

Keywords: cold brittleness; surface active impurities; grain boundary; original charge; impact strength; tempering.

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 performed under project no. 11.6682.2017/8.9.

For citation: Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Tikhonova I. V., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Klement'yev D. S. Influence of Charge Quality on Physical, Mechanical and Operational Properties of Low-Alloy Steel 30KHGSA // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 17-36 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-17-36>.

Received 10.02.2020

Accepted 26.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

Постоянно повышающиеся требования к качеству выпускаемой продукции черной и цветной металлургии ставят перед инженерами-технологами задачу получения сталей и сплавов, обладающих высоким комплексом физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств и способных воспринимать длительно действующие статические, динамические и циклические нагрузки без разрушения.

Одним из эффективных методов получения высококачественных сталей является применение в процессе ее выплавки чистой первородной шихты, свободной или почти свободной от вредных примесей [1, 2]. Причем, по мнению А.П. Гуляева [2], более важно иметь чистую шихту, чем удалять серу и газы сложными металлургическими приемами.

О причине улучшения физико-механических свойств стали, выплав-

ленной на первородной шихте, большинство авторов высказываются осторожно и предположительно. Одни видят причину в меньшем содержании примесей и неметаллических включений [3-5]; другие считают, что изменение свойств стали, выплавленной на первородной шихте, происходит из-за большего роста зерна при нагреве, чем у стали, выплавленной на ломе [1, 2]. Большинство авторов предполагает, что особые свойства стали, выплавленной на шихте прямого восстановления, вызваны строением, чистотой стали и состоянием границ зерен [1, 2, 4]. Однако вплоть до настоящего времени нет четкого представления о причине такого влияния шихты на свойства сталей.

Цель настоящей работы – исследование влияния качества первородной шихты на комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционной низколегированной стали 30ХГСА.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран типичный представитель конструкционных низколегированных сталей – сталь 30ХГСА, выплавленная с использованием металлизированных

окатышей губчатого железа (ГЖ), обычной металлической шихты (ОМШ) и методом кипящего шлакового слоя (КШС). Химический состав и характеристика плавок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав и характеристика исследуемых плавок

Table 1. Chemical composition and characteristics of the studied melts

№ плавки	Шихта	Внепечная обработка вакуумом	Химический состав, %							
			C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr
1	ГЖ	с обработкой	0,34	0,87	1,10	0,006	0,018	0,02	0,08	0,87
2	КШС	без обработки	0,29	0,89	0,91	0,009	0,017	0,04	0,05	1,10
3	ОМШ	с обработкой	0,34	1,02	0,98	0,011	0,017	0,16	0,12	0,87

В соответствии с поставленными задачами исследования сталь 30ХГСА различных плавок, выплавленная на различной шихте, имела одинаковые условия выплавки, вакуумирования, раскисления, разливки и кристаллизации. Температура разливки составила 1600...1620 °С, после вакуумной обработки – 1530...1560 °С. Длительность вакуумирования – 5 минут. Разливку плавок осуществляли в чугунные изложницы сифоном в течение 4...5 минут. Раскисление проводили в ковше алюминием в количестве 4...4,5 кг/плавку. После затвердевания слитки охлаждали в специальных колодцах. Слитки разрезали на 3 части: головную, среднюю и донную (размером 600×600 мм). Среднюю часть затем в горячую ковали и катали до прутка Ø30 мм. Длина прутка составляла 2...3,4 м. После горячей деформации прутки охлаждали на воздухе.

Для исследования механических свойств стали 30ХГСА проводили испытания на одноосное растяжение, ударный изгиб и измерение твердости. Отбор образцов (5 штук от каждой плавки) для испытаний носил случайный характер, что обязательно для получения надежного и точного результата. Ударную вязкость измеряли в диапазоне температур –80...+20 °С (через каждые 20 °С). Испытания на растяжение выполняли на разрывной машине Р-5, а на ударный изгиб – на маятниковом копре МК-30А. Образцы перед испытаниями подвергали следующей термической обработке – закалка от $t = 880$ °С в селитру до $t = 180$ °С, $\tau = 15$ мин; затем замочка в воде; отпуск образцов проводили при температурах 100...700 °С (через 100 °С), $\tau = 2$ часа, охлаждение на воздухе.

Виды образцов для испытаний на одноосное растяжение и ударный изгиб

приведены на рис. 1. После испытаний вычисляли следующие величины: временное сопротивление (σ_B , МПа), относительное сужение (ψ , %), относительное удлинение (δ , %) и ударную вязкость (a_H , Дж/см²).

Соответствующую статистическую обработку экспериментальных результатов проводили по методикам, приведенным в [6, 7, 8, 9].

Для исследования отпускной хрупкости стали 30ХГСА изготавливали образцы для испытаний на ударную вязкость типа I размерами 44×10×10 мм,

которые подвергали закалке от $t = 880$ °С в селитру до $t = 180$ °С, $\tau = 15$ мин. Структура стали после такой обработки представляет мартенсит и остаточный аустенит (HRC 47–49). Отпуск проводили в камерной печи при температурах 500, 520, 525, 530, 535, 540, 545, 550, 555, 560, 570, 580, 600 °С партиями по 15 штук (по 5 образцов от каждой плавки). Продолжительность отпуска 2 часа, а затем медленное охлаждение с печью в течение трех часов. После отпуска структура стали сорбито-трооститная.

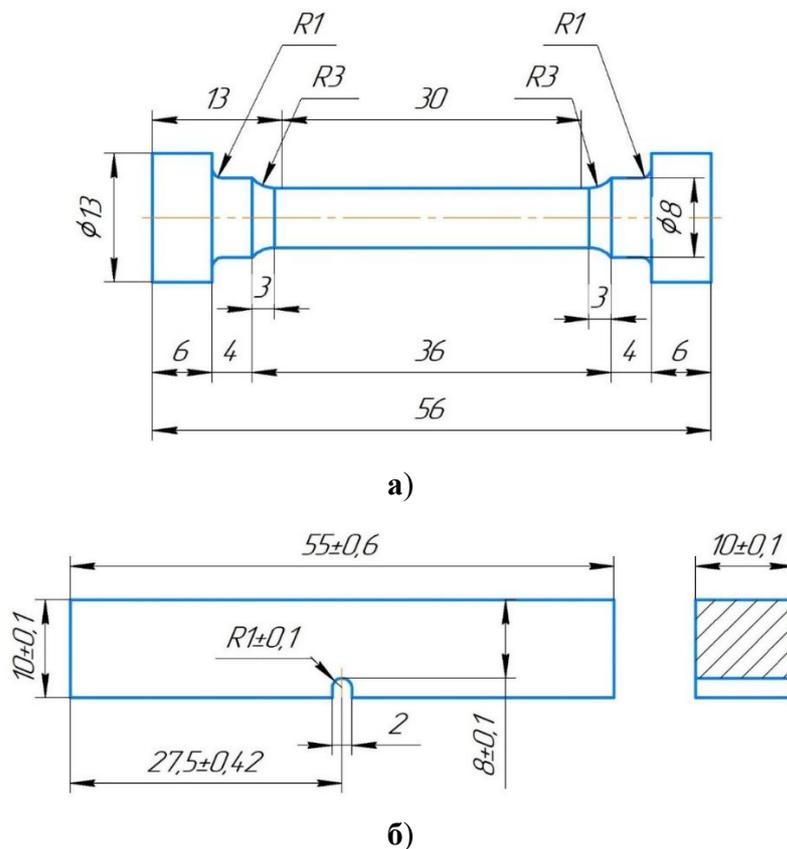


Рис. 1. Виды образцов для механических испытаний: **а** – на одноосное растяжение; **б** – на ударный изгиб

Fig. 1. Specimens for mechanical testing: **a** – uniaxial tension; **b** – the impact strength

Также проводили исследование хладноломкости стали 30ХГСА после проведения горячей деформации, улучшения и

охрупчивающего отпуска при температуре 550 °С в течение 50 часов.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний механических свойств стали 30ХГСА различных плавок после термической обработки приведены в табл. 2.

Из анализа табл. 2 видно, что после закалки и двухчасового отпуска при температуре 100...700 °С механические свойства (σ_B , $\sigma_{0,2}$, ψ , δ , a_H) образцов различных плавок изменяются от темпера-

туры закономерно, заметное разупрочнение начинается с температуры отпуска, равной 300 °С. По пределу прочности, относительному удлинению и твердости различий в плавках не наблюдается. Сталь, выплавленная на первородной шихте (плавка № 1 на ГЖ) при температуре отпуска 450 °С, имеет более высокие характеристики пластичности (ψ) и ударной вязкости (a_H).

Таблица 2. Механические свойства стали 30ХГСА в зависимости от температуры отпуска и вида шихты

Table 2. Mechanical properties of 30HGSA steel depending on the tempering temperature and the type of charge

Механические свойства	Шихта	Закалка	Температура отпуска, °С						
			100	200	300	400	500	600	700
HRC	ГЖ	48	48	48,6	56	53	57	62	68
	КШС	49	53,60	53,80	56,80	58	58	62	69
	ОМШ	50,50	49	53,6	55,80	56	52	59	67
σ_B , МПа	ГЖ	1730	1750	1700	1608	1400	1120	920	740
	КШС	1770	1770	1710	1592	–	–	930	750
	ОМШ	1700	1724	1650	1666	930	–	930	760
δ , %	ГЖ	9,40	13	13	12	13,40	15	20	25
	КШС	10,80	13,60	14,30	12,30	12,30	14	19	25
	ОМШ	12	14,30	14,70	12	13	13	18	25
ψ , %	ГЖ	42	48	48,60	56	53	57	62	68
	КШС	53,40	53,60	53,80	56,80	58	58	62	69
	ОМШ	49,60	49	53,60	55,80	56	52	59	67
a_H , Дж/см ²	ГЖ	70	73	77	75	76	112	226	243
	КШС	78	83	85	94	72	102	176	224
	ОМШ	80	86	88	100	89	88	177	232

Выявлено, что при низких температурах отпуска и особенно после закалки наблюдается разность в относительном сужении.

Как было отмечено выше, сталь 30ХГСА разных плавок различается и по величине ударной вязкости при тем-

пературе отпуска выше 450 °С. Наибольшее различие наблюдается при температуре 600 °С.

Установлено, что между сталью, выплавленной на ГЖ и ОМШ по ударной вязкости, существует значимое различие.

Различие в ударной вязкости существует и при испытаниях при пониженных температурах (табл. 3).

Далее исследовали влияние качества исходной шихты на склонность стали 30ХГСА к отпускной хрупкости и

хладноломкости. По результатам определения ударной вязкости после отпуска в интервале температур 500...600 °С была определена температура максимальной хрупкости (рис. 2), которая соответствует значению 550 °С.

Таблица 3. Ударная вязкость стали 30ХГСА при низких температурах

Table 3. Impact strength of steel 30HGSA at low temperatures

a_H , Дж/см ²	Шихта	Температура испытаний, °С					
		+20	0	-20	-40	-60	-80
	ГЖ	195	154	121	86	59	56
	КШС	170	145	115	88	58	54
	ОМШ	1,0	118	89	53	48	51

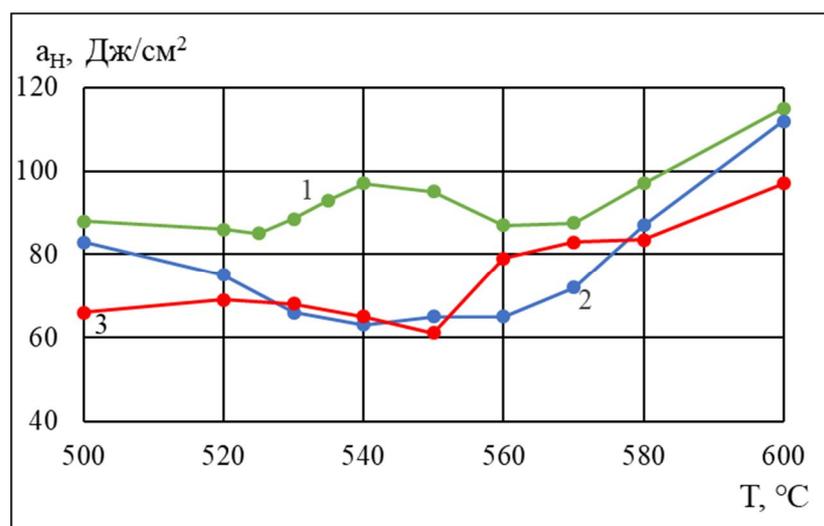


Рис. 2. Влияние шихты на отпускную хрупкость стали 30ХГСА: **1** – плавка на ГЖ; **2** – плавка на полупродукте КШС; **3** – плавка на ОМШ

Fig. 2. The effect of the charge on the release brittleness of steel 30HGSA: **1** – melting on GZH; **2** – melting on KSHS semi-product; **3** – melting on OMSH

При температуре охрупчивания 550 °С отпускали партию из 63 образцов в течение 50 часов (по 21 образцу от плавки) с последующим медленным охлаждением с печью ($\tau = 3,5$ часа). Испытания обработанных образцов (по

3 образца от плавки) проводили при температурах $-80...+20$ °С (через 20 °С).

В качестве охлаждающей жидкости применяли смесь сухого льда с бензином. Измерение температуры проводили с точностью ± 1 °С. Выдержка образцов в термостате при заданной темпера-

туре не менее 15 минут; время установки замороженного образца в копер с момента извлечения из ванны до удара маятника 2...3 секунды.

Результаты испытаний на ударную вязкость представлены на рис. 3. В ка-

честве статистической обработки применяли обработку результатов измерений методом двойного линейного сглаживания по трем точкам [6]. Схема обработки имеет следующий вид:

$$I \quad \bar{y}_1 = \frac{1}{6}(5y_1 + 2y_2 - y_3)$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{3}(y_1 + y_2 + y_3)$$

$$\bar{y}_3 = \frac{1}{3}(y_2 + y_3 + y_4)$$

и т. д.

$$\bar{y}_n = \frac{1}{6}(-y_{n-2} + 2y_{n-1} + 5y_n)$$

$$II \quad \bar{y}_1 = \frac{1}{6}(5\bar{y}_1 + 2\bar{y}_2 - \bar{y}_3)$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{3}(\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3)$$

$$\bar{y}_3 = \frac{1}{3}(\bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4)$$

и т. д.

$$\bar{y}_n = \frac{1}{6}(-\bar{y}_{n-2} + 2\bar{y}_{n-1} + 5\bar{y}_n)$$

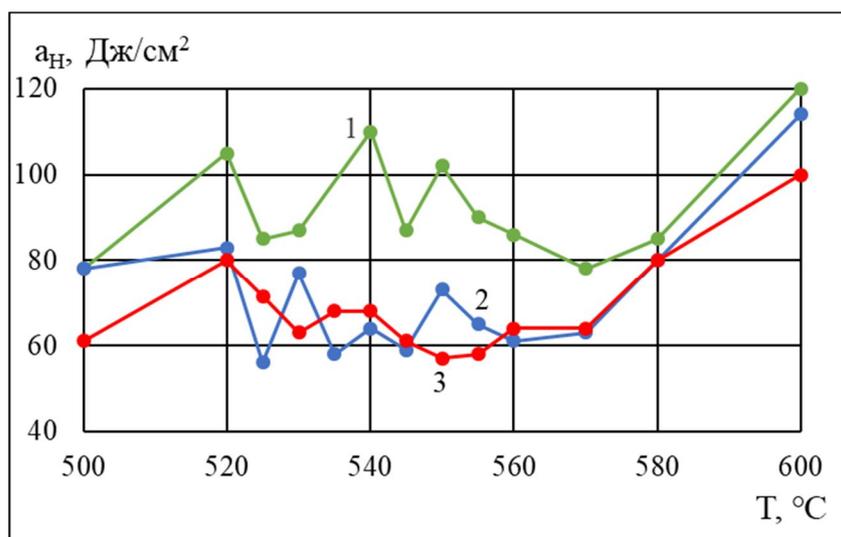


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска стали 30ХГСА:
1 – плавка на ГЖ; 2 – плавка на полупродукте КШС; 3 – плавка на ОМШ

Fig. 3. Dependence of the impact strength on the tempering temperature of steel 30HGSA:
1 – melting on GZH; 2 – melting on Kshs semi-product; 3 – melting on OMSH

Окончательная зависимость ударной вязкости от температуры отпуска и чистоты шихты имеет вид кривых, представленных на рис. 3 (кроме плавки на полупродукте КШС), и напоминает зависимости, полученные автором работы [10]. Абсолютные значения ударной вязкости стали 30ХГСА, выплав-

ленной на ГЖ, при всех температурах отпуска в интервале 500...600 °C выше, чем в плавках на ОМШ и на первородной шихте КШС. Сталь, выплавленная на шихте КШС, по содержанию микропримесей, как известно из литературы, занимает промежуточное положение между плавками на ОМШ и ГЖ [3, 10].

Величины a_H после отпуска при температурах 500, 520, 580 и 600 °С у плавки КШС также являются промежуточными между величинами ударной вязкости в плавках на ОМШ и ГЖ после отпуска при тех же температурах. Однако в интервале температур 530...570 °С кривая зависимости $a_H = f(T_{отп})$ для плавки на полупродукте КШС почти совпадает с подобной кривой у плавки на ОМШ.

Сравнение микроструктур стали 30ХГСА, выплавленной на различной шихте, после закалки и отпуска при температуре хрупкости 550 °С показало, что разница в структуре плавки отсутствует.

Из литературы, известно, что отпускная хрупкость связана с процессами, протекающими на границах зерен [11]. Плавка на ОМШ содержит примесей цветных металлов Cu, Sb, As, Sn в 3...10 раз больше, чем плавка на ГЖ и КШС, а плавка на ГЖ и КШС различается по их количеству в 2...3 раза. Можно предположить взаимное влияние легирующих элементов, примесей и микропримесей. Сила этого взаимного влияния сказывается определенным образом на скорости диффузии примесей по границам зерен и образовании сегрегаций. Согласно теории тройных равновесных сегрегаций, если есть взаимодействие между легирующими элементами и примесями, то один из этих элементов усиливает сегрегацию другого на границе. Так хром, присутствующий

в сплаве, способствует выделению Ni и Sb по границам зерен [7]. Кроме этого, сталь 30ХГСА выплавлена на различной шихте, что может влиять на строение границ зерен [2, 7]. С различием в строении границ зерен связана и различная величина энергии границ, а, следовательно, и различное количество сегрегирующих примесей [12, 8].

По данным работы [10] максимум кривой распределения энергии границ зерен γ_B/γ_S стали 30ХГСА, выплавленной на ОМШ, соответствует меньшему значению, чем в плавках на полупродукте КШС и ГЖ. Это хорошо согласуется с повышенным содержанием в плавке на ОМШ примесей Cu, Ni, Pb, As, Sn, Sb, которые являются поверхностно-активными и должны понижать энергию границ зерен по сравнению с плавками на КШС и ГЖ. Исследования относительной свободной энергии границ зерен аустенита являются косвенным доказательством того, что бывшие границы зерен аустенита в плавке на ОМШ обогащены большим количеством примесей Cu, Sb, As, Sn и др. по сравнению с плавками на ГЖ и КШС. Поэтому в первой плавке наблюдается большее значение ударной вязкости.

Исследование хладноломкости стали 30ХГСА (рис. 4) показало, что во всех плавках с понижением температуры испытаний наблюдается монотонное понижение a_H . Условный порог хладноломкости для стали 30ХГСА определяется при $a_H = 30$ Дж/см².

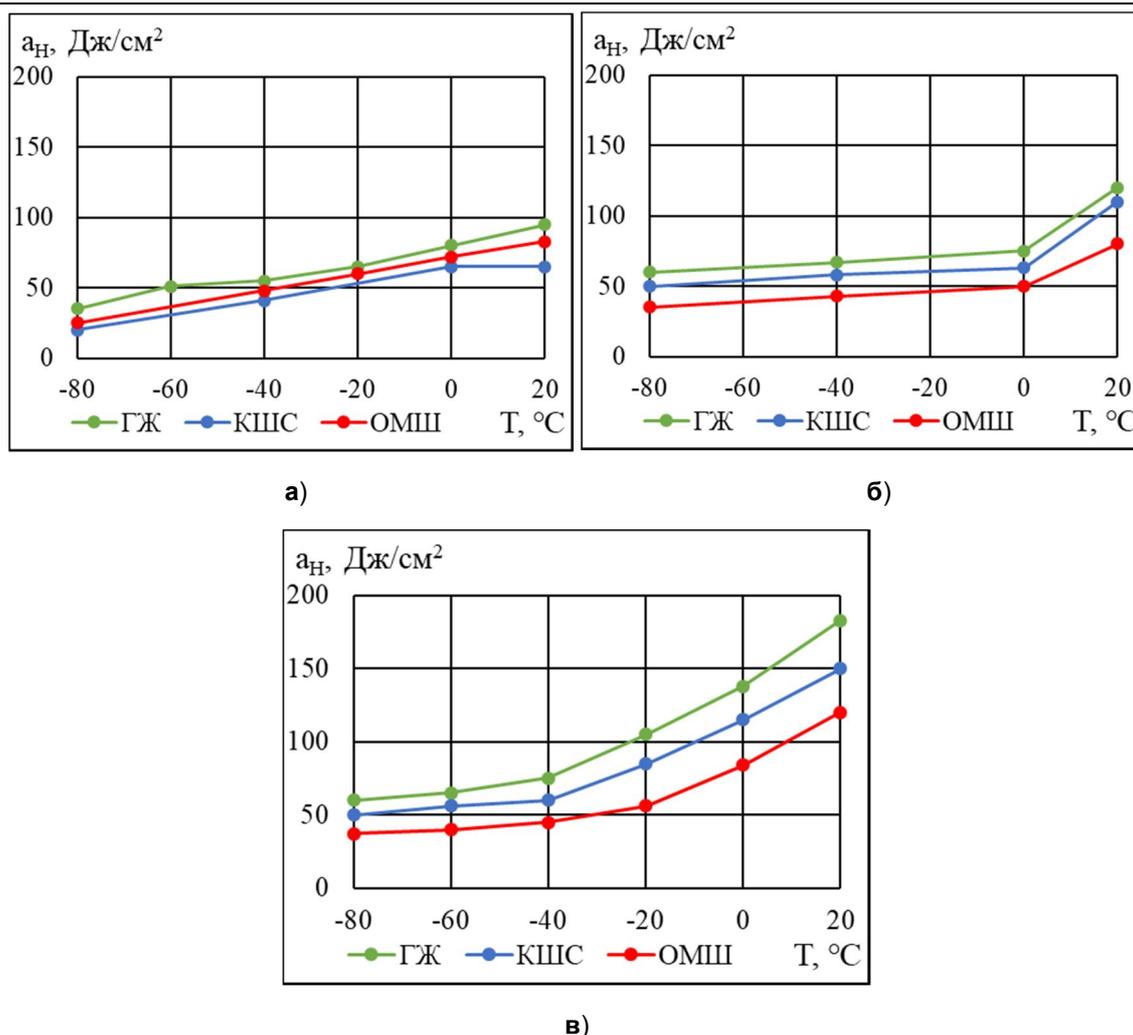


Рис. 4. Влияние шихты стали 30ХГСА на хладноломкость после: **а** – горячей деформации; **б** – охрупчивающего отпуска; **в** – после улучшения

Fig. 4. Effect of 30hgsa steel charge on cold breakage after: **a** – hot deformation; **б** – embrittling release; **в** – after improvement

Во всех трех состояниях наибольшее значение a_H наблюдается у плавки на ГЖ, а наименьшее – в плавке на ОМШ (в состоянии охрупчивания и улучшения, или в плавке на КШС (после горячей деформации)). В состоянии стали после горячей деформации для плавки на ГЖ условный порог хладноломкости составляет -80 °C, в плавках на ОМШ и КШС – (-65 °C). Сдвиг в значениях температуры порога хладноломкости небольшой.

Наибольший уровень a_H наблюдается в состоянии после улучшения и охлаждения на воздухе с температуры 600 °C. Нижний порог хладноломкости для всех плавков лежит при температуре -80 °C.

При медленном охлаждении или во время выдержки при температуре 550 °C происходит обогащение приграничных слоев Cu, Sb, Sn, As и др. Сталь охрупчивается за счет ослабления прочности межзеренных сцеплений и

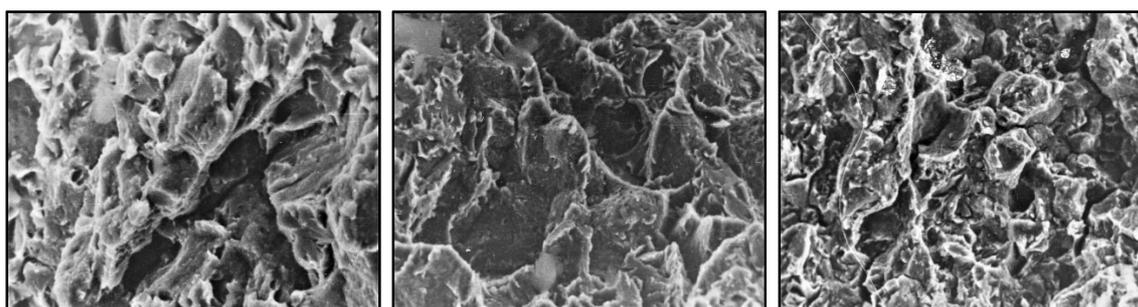
понижения энергии границ. Поскольку во всех плавках количество фосфора приблизительно одинаково, то причину понижения ударной вязкости, вероятно, следует искать в большем количестве сегрегирующих по границам зерен поверхностно-активных примесей Cu, Sb, Sn, As и др.

Фрактографические исследования поверхности излома, проведенные на электронном микроскопе Stereoskan-180, позволили изучить особенности тонкой структуры изломов. Высокая локальность электронного микроскопа делает возможным определение характера разрушения сталей, у которых в области смешанного разрушения в пределах каждого зерна или комплекса зерен имеются участки излома с чашечным или ручьистым строением с димпами вязкого разрушения и фасетками транскристаллитного скола. Исследованию подвергалась только центральная часть излома, т. е. тот участок поверхности, где разрушение происходит в

условиях плоскодеформированного состояния.

Появление в изломе первых участков с ручьистым узором свидетельствует о начале перехода металла из вязкого состояния в хрупкое, что соответствует верхнему порогу хладноломкости. По исчезновению участков с чашечным узором можно судить о конце переходной области, т. е. о нижнем пороге хладноломкости.

Изучение изломов образцов плавки после испытания при температуре +20 °С (рис. 5) показало, что характер излома центральной части смешанный, объединяющий элементы хрупкого и вязкого разрушения. Сравнивая изломы отдельных плавки (рис. 5), можно отметить, что наибольшая доля хрупкого межзеренного разрушения наблюдается в плавке на ОМШ, более грязной по примесям и микропримесям; меньше элементов хрупкого разрушения в плавке на первородной шихте КШС и еще меньше на ГЖ.



а)

б)

в)

Рис. 5. Микрофрактограммы изломов стали 30ХГСА после охрупчивающего отпуска при 550 °С в течение 50 часов; температура испытаний (+20 °С), $\times 500$: **а** – плавка на ГЖ; **б** – плавка на полупродукте КШС; **в** – плавка на ОМШ

Fig. 5. Microfractograms of 30KhGSA steel fractures after embrittling tempering at 550 °C for 50 hours; test temperature (+20 °C), $\times 500$: **a** – melting on GJ; **b** – melting on Kshs semi-product; **v** – melting on OMSH

По виду излома можно сделать вывод, что верхний порог хладноломкости лежит при более высокой температуре. С понижением температуры испытания тонкое строение излома изменяется, увеличивается доля хрупкого межзеренного разрушения в изломах всех

плавков, особенно это заметно в плавке на ОМШ. На микрофрактограммах стали 30ХГСА после охрупчивающего отпуска при температуре испытания ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) четко видны трещины по границам зерен во всех исследуемых плавках (рис. 6).

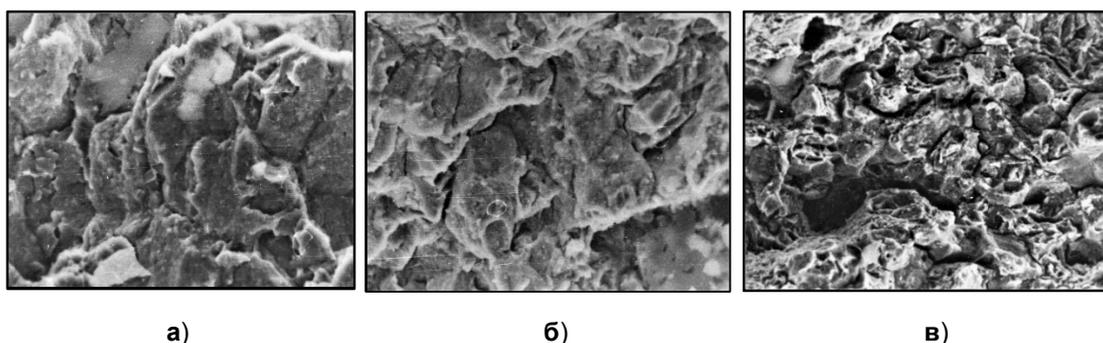


Рис. 6. Микрофрактограммы изломов стали 30ХГСА после охрупчивающего отпуска при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 50 часов; температура испытаний ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\times 500$: **а** – плавка на ГЖ; **б** – плавка на полупродукте КШС; **в** – плавка на ОМШ

Fig. 6. Microfractograms of 30KhGSA steel fractures after embrittlement tempering at $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 50 hours; test temperature ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), $\times 500$: **a** – melting on GJ; **б** – melting on Kshs semi-product; **в** – melting on OMSH

Таким образом, переход от чашечного излома к хрупкому межзеренному разрушению еще раз подтверждает, что слабым местом в процессе разрушения после охрупчивающего отпуска являются границы зерен, обогащенные примесями и микропримесями.

Данные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих процессов обработки металлических сплавов и композиционных материалов [13-34].

Выводы

1. Показано, что характеристики механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, ψ , δ , a_H) у образцов различных плавков стали 30ХГСА уменьшаются с повышением

температуры. Заметное разупрочнение стали 30ХГСА различных плавков начинается с температуры отпуска равной $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. По пределу прочности, относительному удлинению и твердости различий в плавках не наблюдается. Сталь, выплавленная на губчатом железе при температуре отпуска $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеет более высокие характеристики пластичности (ψ) и ударной вязкости (a_H).

2. Определена температура максимальной отпускной хрупкости для стали, выплавленной на обычной металлизированной шихте, которая равна $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Установлено, что сталь 30ХГСА, выплавленная на чистой первородной шихте (губчатое железо), имеет мень-

шую склонность к отпускной хрупкости, чем сталь, выплавленная на обычной шихте. Величина ударной вязкости для этой плавки стали выше, чем у стали обычной выплавки во всем интервале температур отпуска.

3. Установлено, что порог хладноломкости стали 30ХГСА ниже у более чистых плавков на губчатом железе и полупродукте КШС, а величина ударной вязкости при низких температурах выше, чем в плавке на обычной металлизированной шихте.

Список литературы

1. Влияние качества шихты на чувствительность стали 30ХГСА к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 37-48.
2. Гуляев А.П. Чистая сталь. М.: Металлургия, 1975. 184 с.
3. Мартынов О.В., Свободов А.Н., Лещенко И.П. Влияние первородной шихты на свойства конструкционных сталей // Сталь. 1971. № 12.
4. Марченко В.Н., Литвиненко Д.А., Моргалев Б.Н. Свойства стали 18Х2Н4ВА, выплавленной на первородной и обычной шихте // Сталь. 1977. № 7.
5. Физико-механические характеристики стали У10А разных способов выплавки / В.Т. Терещенко, Н.Н. Сергеев, Е.В. Тинькова, Ю.Т. Дадешкелиани // Сталь. 1987. № 2. С. 86-90.
6. Теория прогнозирования и принятия решений / С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин, Э.С. Минаев, Г.С. Пасечник.; под. ред. С.А. Саркисяна. М.: Высшая школа, 1977. 351 с.
7. Улучшение качества и повышение свойств стали массового назначения за счет прогрессивных способов выплавки и обработки: отчет о НИР / Тульский политехнический институт; НПО «Тулачермет»; рук: О.В. Степанова (раздел 1); Э.Г. Титенский (раздел 2); И.Я. Рязанцев (раздел 3). Тула, 1980. 147 с. Исполн.: В.С. Агеев, Н.Н. Сергеев, Н.И. Банина, Л.П. Горелова, Г.Ф. Лапшин. № ГР 77050898.
8. Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н. Механические свойства и внутреннее трение высокопрочных сталей в коррозионных средах: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. 430 с.
9. 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. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.
10. Кожевников И.Ю. Бескоксая металлургия. М.: Металлургия, 1970. 336 с.
11. Утевский Л.М., Гликман Е.Э., Карак Г.С. Обратимая отпускная хрупкость стали и сплавов железа. М.: Металлургия, 1987. 222 с.

12. Влияние качества шихты и температуры отжига на формирование зеренной структуры аустенита в стали 30ХГСА / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 2. С. 8-26.

13. Влияние условий отпуска на механические и коррозионные свойства стали 23Х2Г2Т / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 2(45). С. 128-135.

14. Влияние химического состава стали 23Х2Г2Т на стойкость против коррозионного растрескивания / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.Н. Чуканов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 409-442.

15. Влияние уровня растягивающих напряжений на длительную прочность арматурных сталей в водородсодержащих средах / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 2 (27). С. 6-19.

16. Применение технологии изготовления «корковым» способом формообразующих вставок для литья под давлением медных сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 3(78). С. 67-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83>.

17. Влияние микроструктурных факторов и термической обработки на коррозионную стойкость арматурной стали класса А600 / Н.Н. Сергеев, В.В. Извольский, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев, Д.С. Клементьев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22. № 2(77). С. 52-63.

18. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малий. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 235 с.

19. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

20. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение. 2017. № 7. С. 11-22.

21. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч.1 (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 3. С. 27-33.

22. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. II (обзор) / Сергеев Н.Н., А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2018. № 4. С. 20-29.

23. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // Материаловедение. 2017. № 12. С. 18-25.

24. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

25. Влияние разнотерности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

26. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

27. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

28. 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.

29. 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.

30. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

31. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

32. Современные проблемы технических наук / Н.Н. Сергеев, А. Е. Гвоздев, А. Н. Сергеев, Ю. С. Дорохин, П. Н. Медведев. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2016. 120 с.

33. О состоянии предпревращения металлов и сплавов: монография / О.В. Кузовлева, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова, Н.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, Д.В. Малий, Ю.Е. Титова, С.Е. Александров, Н.А. Крылов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 245 с.

34. Журавлев Г.М., Гвоздев А.Е. Пластическая дилатансия и деформационная повреждаемость металлов и сплавов: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 114 с.

References

1. Sergeev N.N., Tikhonova I.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Ageev E.V., Gvozdev A. E., Klementev D. S. Vliyanie kachestva shikhty na chuvstvitel'nost' stali 30KhGSA k vodorodnomu rastreskivaniyu [Influence of charge quality on the sensitivity of 30KhGSA steel to hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 37-48 (In Russ.).

2. Gulyaev A. P. *Chistaya stal'* [Pure steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 184 p. (In Russ.).

3. Martynov O. V., Svobodov A. N., Leshchenko I. P. Vliyanie pervorodnoi shikhty na svoistva konstruktsionnykh stalei [Influence of primordial charge on the properties of structural steels]. *Stal' = Steel*, 1971, no. 12 (In Russ.).

4. Marchenko V. N., Litvinenko D. A., Morgalev B. N. Svoistva stali 18Kh2N4VA, vylavlennoi na pervorodnoi i obychnoi shikhte [Properties of 18x2h4va steel, smelted on original and conventional charge]. *Stal' = Steel*, 1977, no. 7 (In Russ.).

5. Tereshchenko V. T., Sergeev N. N., Tinkova E. V., Dadeshkeliani Yu. T. Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki stali U10A raznykh sposobov vylavki [Physical and mechanical characteristics of steel U10A of different methods of smelting]. *Stal' = Steel*, 1987, no. 2, pp. 86-90 (In Russ.).

6. Sarkisyan S. A., Kaspin V. I., Lisichkin V. A., Minaev E. S., Pasechnik G. S. *Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya reshenii* [Theory of forecasting and decision-making], ed. by S. A. Sarkisyan, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 351 p. (In Russ.).

7. Uluchshenie kachestva i povyshenie svoistv stali massovogo naznacheniya za schet progressivnykh sposobov vylavki i obrabotki. Otchet o NIR [Improving the quality and improving the properties of mass-purpose steel due to progressive methods of smelting and processing. Report on research]. Tula, 1980, 147 p. GR no. 77050898 (In Russ.).

8. Sergeev N. N., Sergeev A. N. *Mekhanicheskie svoistva i vnutrennee trenie vysokopochnykh stalei v korrozionnykh sredakh* [Mechanical properties and internal friction of high-strength steels in corrosive environments]. Tula, 2018, 430 p. (In Russ.).

9. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sapozhnikov S. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Prinyatie reshenii po statisticheskim modelyam v upravlenii kachestvom produktsii [Decisions on Statistical Models in Quality Control of Products]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2017, vol. 21, no. 5(74), pp. 78-92 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2017-21-5-78-92>.

10. Kozhevnikov I. Yu. *Beskoksovaya metallurgiya* [Beskoksovaya metallurgy], Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 336 p. (In Russ.).

11. Utevsky L. M., Glikman E. E., Karak G. S. *Obratimaya otpusknaya khrupkost' stali i splavov zheleza* [Reversible release brittleness of steel and iron alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 222 p. (In Russ.).

12. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Minaev I.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementev D. S. Vliyanie kachestva shikhty i temperatury otzhiga na formirovanie zerennoi struktury austenita v stali 30KhGSA [Influence of Quality of the Charge and the Antibreating Temperature on the Formation of the Granular Structure of Austenitis in Steel 30KhGSA]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 8-26 (In Russ.).

13. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E. Vliyanie uslovii otpuska na mekhanicheskie i korrozionnye svoistva stali 23Kh2G2T [Influence of tempering conditions on the mechanical and corrosion properties of steel 23X2G2T]. *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov*, 2018, no. 2(45), pp. 128-135 (In Russ.).

14. Sergeev N. N., Izvolsky V. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Chukanov A. N., Pantyukhin O. V. Vliyanie khimicheskogo sostava stali 23Kh2G2T na stoikost' protiv korrozionnogo rastreskivaniya [Influence of the chemical composition of steel 23X2G2T on the resistance against corrosion cracking]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Science*, 2018, is. 9, pp. 409-442 (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Kutepov S. N., Ageev E. V. Vliyanie urovnya rastyagivayushchikh napryazhenii na dlitel'nuyu prochnost' armaturnykh staley v vodorodsoderzhashchikh sredakh [Influence of the level of tensile stresses on the long-term strength of reinforcing steels in hydrogen-containing media]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, vol. 8, no. 2 (27), pp. 6-19 (In Russ.).

16. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Klementev D. S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobrazuyushchikh vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednykh splavov [Application of technology for manufacturing "Corky" forming inserts for injection molding of copper alloys]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 3(78), pp. 67-83 (In Russ.). [https://doi.org/ 10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83](https://doi.org/10.21869/2223-1560-2018-22-3-67-83).

17. Sergeev N. N., Izvolsky V.V., Sergeev A.N., Kutepov S.N., Gvozdev A.E., Ageev E. V., Klementev D. S. Primenenie tekhnologii izgotovleniya «korkovym» sposobom formoobra-zuyushchikh vstavok dlya lit'ya pod davleniem mednykh splavov [The Influence of Microstructural Factors and Heat Treatment on The Corrosion Resistance of Reinforcing

Steel Class A 600]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2018, vol. 22, no. 2(77), pp. 52-63 (In Russ.).

18. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A.D., Sergeev N. N., Kuzovleva O. V., Starikov N. E., Maliy D. V. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016, 235 p. (In Russ.).

19. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A. Vliyanie deformatsionnoi povrezhdaemosti na formirovanie mekhanicheskikh svoystv malouglerodistykh staley [Influence of deformation damage on the formation of mechanical properties of low-carbon steels]. *Proizvodstvo prokata = Manufacture of hire*, 2015, no. 12, pp. 9-13 (In Russ.).

20. Baranov V. P., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Sergeev N. N., Chukanov A. N. Mnogourovnevnyi podkhod k probleme zamedlennogo razrusheniya vysokoprochnykh konstruktsionnykh staley pod deistviem vodoroda [Multilevel approach to the problem of delayed destruction of high-strength structural steels under the action of hydrogen]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 7, pp. 11-22 (In Russ.).

21. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Ch.I (obzor) [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Part I (review)]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

22. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov. Ch.II (obzor) [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys. Part II (review)]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

23. Sergeev N. N., Tereshin V. A., Chukanov A. N., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A., Sergeev A. N., Leontiev I. M., Honelidze D. M., Gvozdev A. E. Formirovanie plasticheskikh zon okolo sfericheskoi polosti v uprochnennykh nizkouglerodistykh stalyakh v usloviyakh vodorodnoi stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

24. Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M., Kolmakov A. G. Formirovanie mekhanicheskikh svoystv uglerodistykh staley v protsessakh vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Metal Technology*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

25. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., I Minaev. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Influence of different-grained

austenite on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

26. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov vtorogo roda [The role of the germ formation process in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

27. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Organic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

28. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Tikhonova I. V., Kutepov S. N., Kuzovlev 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.).

29. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Gvozdev A. E., Ageev E. V. Diffuziya vodoroda v svarnykh soedineniyakh konstruktsionnykh stalei [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.).

30. Gvozdev A. E., Sergeyev N. N., Minayev I. V., Tikhonova I. V., Sergeyev A. N., Khonelidze D. M., Maliy D. V., Golyshev I. V., Kolmakov A. G., Provotorov D. A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. *Organic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

31. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E., Cheglov A. E., Sergeev N. N., Gubanov O. M. Variant opredeleniya maksimal'nogo plasticheskogo uprochneniya v instrumental'nykh stal'yakh [Option for determining the maximum plastic hardening in tool steels]. *Stal' = Steel*, 2017, no. 6, pp. 26-39 (In Russ.).

32. Sergeev N. N., Gvozdev A. E., Sergeev A. N., Dorokhin Yu. S., Medvedev P. N. *Sovremennye problemy tekhnicheskikh nauk* [Modern problems of technical Sciences]. Tula, 2016, 120 p. (In Russ.).

33. Kuzovleva O. V., Gvozdev A. E., Tikhonova I. V., Sergeev N. N., Breki A. D., Starikov N. E., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Maliy D. V., Titova Yu. E., Aleksandrov S. E., Krylov N. A. *O sostoyanii predprevrashcheniya metallov i splavov* [On the state of pre-conversion of metals and alloys]. Tula, 2016, 245 p. (In Russ.).

34. Zhuravlev G. M., Gvozdev A. E. *Plasticheskaya dilatatsiya i deformatsionnaya povrezhdaemost' metallov i splavov* [Plastic dilatancy and deformational damage of metals and alloys]. Tula, 2014, 114 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Сергеев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Nikolay N. Sergeev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: technology@tspu.tula.ru

Сергеев Александр Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: ansergueev@mail.ru

Aleksandr N. Sergeev, Dr. of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: ansergueev@mail.ru

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Тихонова Ирина Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Физика металлов и металловедение», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Российская Федерация, e-mail: TichonovaIV@mail.ru

Irina V. Tikhonova, Cand of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Metal Physics and Metal Science Department, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: TichonovaIV@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Клементьев Денис Сергеевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

Denis S. Klement'yev, Undergraduate, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: denis.klementev.93@mail.ru

К построению амплитудной зависимости внутреннего трения при колебаниях пористых металлических композитов

И. К. Архипов¹, В. И. Абрамова¹, А. Е. Гвоздев¹, Е. В. Агеев²✉,
С. Н. Кутепов¹, А. А. Калинин³

¹ ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого»
пр. Ленина 125, г. Тула 300026, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО Тульский государственный университет
пр. Ленина 92, г. Тула 300012, Российская Федерация

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Построение амплитудной зависимости декремента продольных и изгибных колебаний образцов пористых металлических композитов, изготовленных по 3D-технологии.

Методы. Основное внимание уделено роли микропластичности в рассеянии энергии колебаний, поскольку величина декремента в композите будет больше, чем в монолитном материале. Учитывается влияние пористости на уровень рассеяния энергии. Использовалась статистическая модель, основанная на результатах теории функционалов, заданных на случайных процессах.

Результаты. Это позволило найти концентрацию микропластических зон в композите при продольных и изгибных колебаниях образца. Величина декремента колебаний определяется как отношение потенциальной энергии пластических деформаций к общей потенциальной энергии всего образца. Для вычисления эффективных модулей в композите применяется известная методика теории упругости микронеоднородных сред. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пористость существенно влияет на концентрацию микропластических зон и рассеяние внутреннего трения при продольных и изгибных колебаниях. Однако следует отметить, что при малых амплитудах микропластические области в окрестностях пор не образуются. Поэтому причины возникновения рассеяния энергии не объясняются только микропластичностью. Источником таких потерь являются дислокационные, ферромагнитные и другие причины. Однако уровень этих потерь значительно меньше, чем указанный в данной работе, и зависит только от частоты колебаний.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения различной природы слитковых, порошковых и композиционных материалов с высокой дисперсностью в фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях.

Ключевые слова: внутреннее трение; металлические композиты; микропластические зоны; напряженно-деформированное состояние.

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

Финансирование: Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №11.6682.2017/8.9.

Для цитирования: К построению амплитудной зависимости внутреннего трения при колебаниях пористых металлических композитов / И. К. Архипов, В. И. Абрамова, А. Е. Гвоздев, Е. В. Агеев, С. Н. Кутепов, А. А. Калинин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 37-48. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-37-48>.

Поступила в редакцию 27.02.2020

Подписана в печать 16.03.2020

Опубликована 20.04.2020

To the Construction of the Amplitude Dependence of Internal Friction with Vibrations of Porous Metal Composites

Igor S. Arkhipov¹, Vlada I. Abramova¹, Alexander E. Gvozdev¹,
Evgeny V. Ageev² ✉, Sergei N. Kutepov¹, Anton A. Kalinin³

¹ Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy
125 Lenin str., Tula 300026, Russian Federation

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

³ Tula State University
92 Lenin str., Tula 300012, Russian Federation

✉ e-mail: ageev_ev@mail.ru

Abstract

Purpose of research was to plot the amplitude dependence of the decrement of longitudinal and bending vibrations of samples of porous metal composites manufactured using 3D technology.

Methods. The main attention is paid to the role of microplasticity in the scattering of the vibration energy, since the decrement value in composite will be greater than in monolithic material. The effect of porosity on the level of energy dissipation is taken into account. We have used a statistical model based on the results of the theory of functionals given on random processes.

Results. This made it possible to find the concentration of microplastic zones in the composite during longitudinal and bending vibrations of the sample. The value of the vibration decrement is defined as the ratio of the potential energy of plastic deformations to the total potential energy of the entire sample. To calculate the effective moduli in the composite, the well-known technique of the theory of elasticity of micro-inhomogeneous media is used. The results obtained indicate that porosity significantly affects the concentration of microplastic zones and the scattering of internal friction during longitudinal and bending vibrations. However, it should be noted that at low amplitudes, microplastic regions are not formed in the vicinity of the pores. Therefore, the reasons for the appearance of energy dissipation are not explained only by microplasticity. The source of such losses are dislocation, ferromagnetic and other reasons. However, the level of these losses is much less than that indicated in this work, and depends only on the oscillation frequency.

Conclusion. The results obtained can be used to establish the patterns of behavior of various natures of ingot, powder and composite materials with high dispersion in phase and structural components in various conditions and states.

Keywords: internal friction; metal composites; microplastic zones; stress-strain state.

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 prepared as part of the state task of the Ministry of education and science of the Russian Federation No. 11.6682.2017/8.9.

For citation: Arkhipov I. C., Abramova V. I., Gvozdev A. E., Ageev E. V., Kutepov S.N., Kalinin A. A. To the Construction of the Amplitude Dependence of Internal Friction with Vibrations of Porous Metal Composites // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 37-48 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-37-48>.

Received 27.02.2020

Accepted 16.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

Напряженно-деформированное состояние в пористых композитах обладает свойствами микропластичности. В этом случае в окрестностях пор возникает концентрация напряжений, которые превышают предел текучести материала матрицы.

В матрице при этом появляются микропластические зоны. При колебаниях в этих зонах происходит потеря потенциальной энергии. Поэтому величина декремента в композите будет больше, чем в монолитном материале.

Целью работы является построение амплитудной зависимости декремента продольных и изгибных колебаний образцов пористых металлических композитов, изготовленных по 3D-технологии.

Материалы и методы

Основное внимание уделено роли микропластичности в рассеянии энергии колебаний. Учитывается влияние пористости на уровень рассеяния энергии. Использовалась статистическая модель, основанная на результатах теории функционалов, заданных на случайных процессах.

Результаты и их обсуждение

Для построения расчетной амплитудной зависимости декремента необходимо знать концентрацию микропластических зон в композите. С учетом этой концентрации можно построить кривую нагружения при первом цикле колебаний. Также можно вычислить меру рассеяния энергии в микропластических зонах (на единицу объема).

Концентрация микропластических зон определяется из статистической модели [1] как вероятность превышения интенсивности напряжений $\sigma_i(x)$ над пределом текучести материала σ_s . Используя результаты теории функционалов, заданных на случайных процессах [2], для стационарного и нормального случайного процесса $\sigma_i(x)$ получим соотношение [1]:

$$C_p = C_2 [1 - \Phi(y)], \quad (1)$$

$$\text{где } \Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2)$$

$$y = \frac{\sigma_s - \langle \sigma_i \rangle}{\sqrt{D_{\sigma\sigma}}}. \quad (3)$$

Для вычисления концентрации микропластических зон C_p необходимо знать дисперсию $D_{\sigma\sigma}$ процесса $\sigma_i(x)$, среднее значение $\langle \sigma_i \rangle$ и объемную кон-

центрацию матрицы C_2 . Вычисление дисперсии для пористого металлического композита произведено в работе [1]:

$$D_{\sigma\sigma} = p(1-p) \left(\frac{\mu_2}{\mu_*} \right)^2 \langle \sigma_i \rangle^2 \chi^2, \quad (4)$$

где p – пористость композита; μ_2 – модуль сдвига в матрице; μ_* – эффективный модуль сдвига композита;

$$\chi = \frac{3-4\nu}{5(1-\nu)}; \nu - \text{коэффициент Пуассона}$$

в матрице.

Амплитудная зависимость декремента продольных колебаний определяется в виде формулы [3]:

$$\delta(\sigma_a) = \frac{\Delta W}{2W}, \quad (5)$$

где ΔW – потери удельной энергии формоизменения при пластической деформации; W – общая удельная энергия (в единице объема).

Величина ΔW определяется для идеально-пластического материала в виде [4]:

$$\Delta W = \frac{\sigma_s^2}{2E_2} c_p. \quad (6)$$

При одноосном растяжении величина W определяется по формуле

$$W = \frac{\sigma_a^2}{2E_*}, \quad (7)$$

где σ_a – амплитуда напряжений; E_* – эффективный модуль Юнга композита.

Применяя сингулярное приближение теории случайных функций [5], вычислим E_* по формулам (8)–(11):

$$E_* = \frac{9K_*\mu_*}{3K_* + \mu_*}, \quad (8)$$

$$K_* = (1-p)K_2 - \frac{p(1-p)K_2^2}{pK_2 + a}, \quad (9)$$

$$\mu_* = (1-p)\mu_2 - \frac{p(1-p)\mu_2^2}{p\mu_2 + b}, \quad (10)$$

$$a = \frac{4}{3}(1-p)\mu_2; \quad ,$$

$$b = \frac{1}{6}(1-p) \frac{\mu_2(9K_2 + 8\mu_2)}{K_2 + 2\mu_2}, \quad (11)$$

где K_2 , μ_2 – объемный и сдвиговой модули упругости материала матрицы.

Расчетная амплитудная зависимость декремента $\delta(\sigma_a)$ получена из (6)–(7) с учетом (8)–(11) в виде

$$\delta(\sigma_a) = \frac{1}{2} \frac{\sigma_s^2}{\sigma_a^2} c_p \frac{E_*}{E_2}, \quad (12)$$

где зависимость $c_p(\sigma_a)$ получена из формул (1)–(3) с заменой $\langle \sigma_i \rangle$ на (σ_a) .

Расчет $\delta(\sigma_a)$ по формуле (12) произведем для пористостей $p_1 = 0,3$ и $p_1 = 0,5$ при следующих данных $K_2 = 170$ ГПа, $\mu_2 = 80$ ГПа, $E_2 = 226$ ГПа, $\sigma_s = 400$ ГПа.

График расчетной зависимости $\delta(\sigma_a)$ представлен на рис. 1.

При изгибных колебаниях напряженно-деформированное состояние в образце становится существенно неоднородным. Размеры микропластических зон будут зависеть от координат. Случайный процесс σ_i будет случайным полем $\sigma_i(x, y, z)$, которое будет нестационарным. Алгоритм вычисления c_p , предложенный для продольных колебаний, будет непригоден. Поэтому предлагается следующая модель вычисления концентрации микропластических зон (рис. 1):

1. Производится преобразование переменной $\sigma_i(x, y)$ по формулам:

$$Y = \frac{\sigma_i(x, y)}{x}, \quad (13)$$

где $\sigma_i(x, y)$ определяется из [4]:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad (14)$$

$$\sigma_x = \frac{P_{xy}}{J}, \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{P(h^2 - 4y^2)}{8J}, \quad (16)$$

где P – нагрузка при первом цикле нагружения, H, J – момент инерции поперечного сечения, m^4 ; $J = \frac{bh^3}{12}$; b – ширина; h – высота образца.

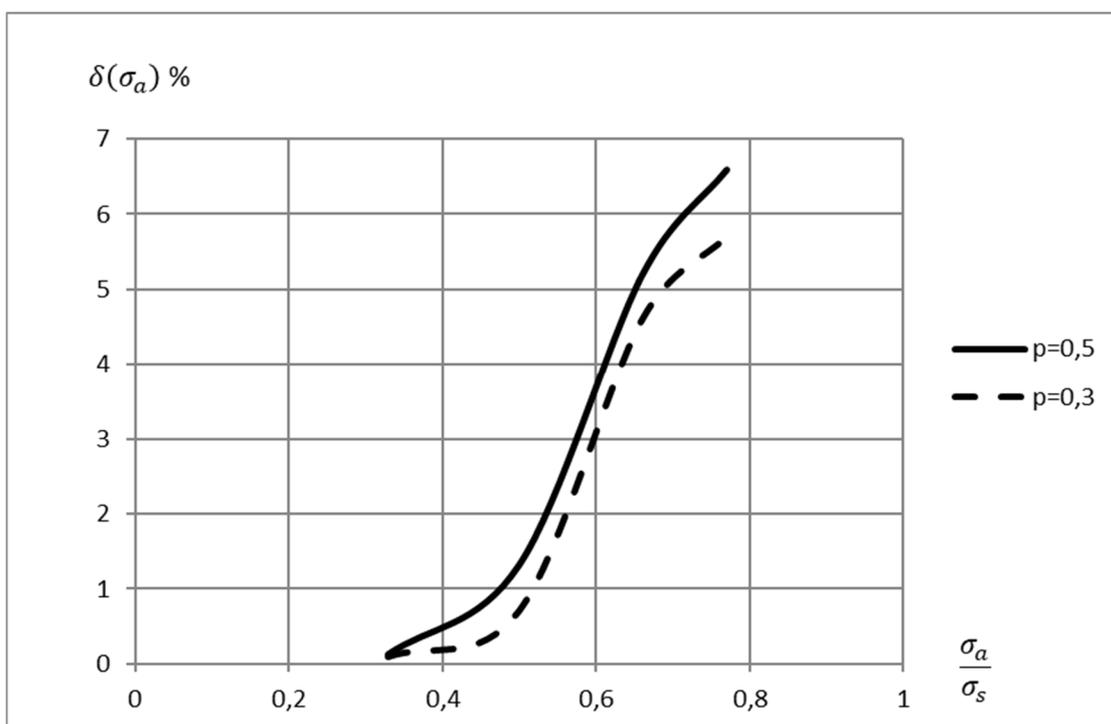


Рис. 1. Расчетная амплитудная зависимость внутреннего трения при продольных колебаниях образца пористого композита с различными пористостями

Fig. 1. Calculated amplitude dependence of internal friction for longitudinal vibrations of a sample of a porous composite with different porosities

Величина σ_i меняется во времени от 0 до σ_a – амплитуды интенсивности напряжений. Максимальное значение σ_i достигается в заделке консоли, т. е. при $x = l, y = h/2$. Это значение равно:

$$\sigma_{\max} = \frac{Phl}{2I}. \quad (17)$$

При $y = h/2$ преобразованная переменная Y из (13) имеет вид:

$$Y = \frac{\sigma_{\max}}{l}(1 + \varphi(x)), \quad (18)$$

где $\varphi(x)$ – стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией $D_{\varphi\varphi}$. На основании центральной предельной теоремы [6] можно утверждать при большом количестве пор, что этот процесс гауссовский. Таким образом:

$$\langle Y \rangle = \frac{\sigma_{\max}}{l}, \quad (19)$$

$$D_{yy} = \left(\frac{\sigma_{\max}}{l} \right)^2 D_{\phi\phi}. \quad (20)$$

2. Вероятность превышения случайного процесса Y над уровнем σ_s/l определяется при $y = h/2$ по методике [1]:

$$c_{p1} = c_2 \left(1 - \frac{\Phi(z)}{\sqrt{D_{\phi\phi}}} \right), \quad (21)$$

где $c_2 = 1 - p$, $z = (\sigma_s / \sigma_{\max}) - 1$,

$$\sqrt{D_{\phi\phi}} = \sqrt{p(1-p)} \frac{\mu_*}{2\mu_2}, \quad (22)$$

где p – пористость в образце композита; μ_* – эффективный модуль сдвига композита; μ_2 – модуль сдвига в матрице.

Эффективный модуль сдвига μ_* в зависимости от пористости определен в работе [5].

3. Произведем послойное разделение объема консоли по высоте. При этом в каждом слое при $y_i = \frac{h}{2} - i\Delta h_i$

произведем аналогичные вычисления для c_{pi} ($i = 1, 2, 3 \dots n$). Если пределы при растяжении и сжатии материала консоли одинаковы, то концентрации микропластических зон в растянутой и сжатой части консоли определяются одинаково. Величина c_p во всем образце определяется тогда по формуле

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^n c_{pi} V_i}{V}, \quad (23)$$

где V_i – объем i -го слоя; V – объем образца, $V = bhl$.

Расчет по формуле (23) производится при различных отношениях σ_s / σ_a . Результаты расчета приведены в табл. 1.

Расчет амплитудной зависимости декремента при изгибных колебаниях произведем по формуле (12). Результаты расчета для двух пористостей $p = 0,3$ и $p = 0,5$ приведены в табл. 2.

Таблица 1. Зависимость концентрации микропластических зон от амплитуды напряжений при консольном изгибе и пористости композита

Table 1. The dependence of the concentration of microplastic zones on the stress amplitude at the cantilever bend and the porosity of the composite

σ_s / σ_a	3	2	1,5	1,3
$c_p, p = 0,3$	0,0009	0,007	0,042	0,117
$c_p, p = 0,5$	0,008	0,015	0,085	0,148

Таблица 2. Амплитудная зависимость декремента изгибных колебаний консольного образца

Table 2. Amplitude dependence of the Flexural vibration decrement of the cantilever sample

σ_s / σ_a	3	2	1,5	1,3
$\delta(\sigma_a), p = 0,3$	0,0022	0,0084	0,028	0,059
$\delta(\sigma_a), p = 0,5$	0,009	0,015	0,047	0,063

Из табл. 1 и 2, а также из рис.1 следует, что пористость существенно влияет на концентрацию микропластических зон и рассеяние внутреннего трения при продольных и изгибных колебаниях. Однако следует отметить, что при малых амплитудах $\sigma_a < \frac{\sigma_s}{3}$ микропластические области в окрестностях пор не образуются [4]. Поэтому причины возникновения рассеяния энергии не объясняются только микропластичностью. Источником таких потерь являются дислокационные, ферромагнитные и

другие причины [7-23]. Однако уровень этих потерь значительно меньше, чем указанный в данной работе, и зависит только от частоты колебаний.

Выводы

Полученные результаты могут быть использованы при установлении закономерностей поведения различной природы слитковых, порошковых и композиционных материалов с высокой дисперсностью в фазовых и структурных составляющих в различных условиях и состояниях.

Список литературы

1. Архипов И.К., Толоконников Л.А. Эффективные соотношения между напряжениями и деформациями в корреляционной теории упругопластических деформаций // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1984. Т. 2. С. 196-200.
2. Хусу А.П. О некоторых встречающихся в технике функционалах, заданных на процессах // Вестник ЛГУ. 1956. Т. 1. № 1. С. 88-100.
3. Архипов И.К., Головин С.А., Петрушин Г.Д. К оценке рассеяния энергии в композиционных материалах // Проблемы прочности. 1984. № 8. С. 94-96.
4. Безухов Н.И. Основы упругости, пластичности и ползучести. М: Высшая школа, 1968. 512 с.
5. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
6. Чистяков В.П. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1978. 224 с.
7. Головин С.А. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 190 с.
8. Архипов И.К., Абрамова В.И. Определение концентрации микропластических зон в композите по амплитудной зависимости декремента колебаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 490-493.
9. Гвоздев А.Е. Экстремальные эффекты прочности и пластичности в металлических высоколегированных слитковых и порошковых системах: монография. 2 изд., испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 476 с.

10. Макаров Э.С., Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и оп. Тула: Издательство ТулГУ, 2015. 337 с.

11. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on ShKh15 steel / A.D. Breki, S.E. Aleksandrov, K.S. Tyurikov, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, A.A. Kalinin // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Т. 9. № 4. С. 714-718.

12. Влияние качества шихты на чувствительность стали 30ХГСА к водородному растрескиванию / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 1 (30). С. 37-48.

13. Влияние качества шихты и температуры отжига на формирование зеренной структуры аустенита в стали 30ХГСА / Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев, Д.С. Клементьев // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2019. Т. 9, № 2. С. 8-26.

14. Разработка прогрессивных технологий получения и обработки металлов, сплавов, порошковых и композиционных наноматериалов: монография / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.А. Калинин, А.Д. Бреки, Н.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, Д.В. Малый. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. 235 с.

15. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. I (обзор) / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2018. № 3. С. 27-33.

16. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов. Ч. II (обзор) / Сергеев Н.Н., А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2018. № 4. С. 20-29.

17. Формирование пластических зон около сферической полости в упрочненных низкоуглеродистых сталях в условиях водородной стресс-коррозии / Н.Н. Сергеев, В.А. Терешин, А.Н. Чуканов, А.Г. Колмаков, А.А. Яковенко, А.Н. Сергеев, И.М. Леонтьев, Д.М. Хонелидзе, А.Е. Гвоздев // *Материаловедение*. 2017. № 12. С. 18-25.

18. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // *Технология металлов*. 2015. № 11. С. 17-29.

19. Влияние разнотерности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // *Материаловедение*. 2014. № 7. С. 23-26.

20. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // *Материаловедение*. 2015. № 1. С. 15-21.

21. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

22. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 148-152.

23. Длительная прочность арматурной стали 22Х2Г2АЮ при испытаниях на коррозионное растрескивание в кипящем растворе нитратов / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Н. Сергеев, А. Г Колмаков, В.В. Извольский, А.Е. Гвоздев // *Деформация и разрушение материалов*. 2019. № 8. С. 33-39.

References

1. Arkhipov I. K., Tolokonnikov L. A. Effektivnye sootnosheniya mezhdu napryazheniyami i deformatsiyami v korrelyatsionnoi teorii uprugoplasticheskikh deformatsii [Effective relations between stresses and deformations in the correlation theory of elastic-plastic deformations]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Solid Mechanics*, 1984, vol. 2, pp. 196-200 (In Russ.).

2. Khusu A. P. O nekotorykh vstrechayushchikhsya v tekhnike funktsionalakh, zadannykh na protsessakh [On some functionals found in technology, specified on processes]. *Vestnik LGU. = Bulletin of LSU*, 1956, vol. 1, no. 1, pp. 88-100 (In Russ.).

3. Arkhipov I. K., Golovin S. A., Petrushin G. D. K otsenke rasseyaniya energii v kompozitsionnykh materialakh [Estimation of energy scattering in composite materials]. *Problemy prochnosti = Problems of Strength*, 1984, no. 8, pp. 94-96 (In Russ.).

4. Bezukhov N. I. *Osnovy uprugosti, plastichnosti i polzuchesti* [Fundamentals of elasticity, plasticity and creep]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968, 512 p. (In Russ.).

5. Shermergor T. D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of elasticity of micro-homogeneous media]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 399 p. (In Russ.).

6. Chistyakov V. P. *Kurs teorii veroyatnostei* [Course of probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 224 p. (In Russ.).

7. Golovin S. A. *Uprugie i dempfirovuyushchie svoystva konstruktsionnykh metallicheskih materialov* [Elastic and damping properties of structural metal materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 190 p. (In Russ.).

8. Arkhipov I. K., Abramova V. I. Opredelenie kontsentratsii mikroplasticheskikh zon v kompozite po amplitudnoi zavisimosti dekrementa kolebaniy [Determination of the concentration of microplastic zones in a composite by the amplitude dependence of the oscillation decrement]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya of the Tula State University. Technical Science*, 2019, is. 3, pp. 490-493 (In Russ.).

9. Gvozdev A. E. *Ekstremal'nye efekty prochnosti i plastichnosti v metallicheskih vysokolegirovannykh slitkovykh i poroshkovykh sistemakh* [Extreme effects of strength and plasticity in metal high-alloy ingot and powder systems]. Tula, 2019, 476 p. (In Russ.).

10. Makarov E. S., Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M. *Teoriya plastichnosti dilatiruyushchikh sred* [Theory of plasticity of dilating media]. Tula, 2015. 337 p. (In Russ.).

11. Breki A.D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K. S., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Kalinin A. A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on ShKh15 steel. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, no.4, pp. 714-718.

12. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementiev D. S. Vliyanie kachestva shikhty na chuvstvitel'nost' stali 30KhGSA k vodorodnomu rastreskivaniyu [Influence of charge quality on the sensitivity of 30KhGSA steel to hydrogen cracking]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 1 (30), pp. 37-48 (In Russ.).

13. Sergeev N. N., Tikhonova I. V., Minaev I. V., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Ageev E. V., Gvozdev A. E., Klementiev D. S. Vliyanie kachestva shikhty i temperatury otzhiga na formirovanie zerennoi struktury austenita v stali 30KhGSA [Influence of the charge quality and annealing temperature on the formation of the grain structure of austenite in 30KhGSA steel]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 8-26 (In Russ.).

14. Shorshorov M. H., Gvozdev A. E., Zolotukhin V. I., Sergeev A. N., Kalinin A. A., Breki A.D., Sergeev N. N., Kuzovleva O. V., Starikov N. E., Maliy D. V. *Razrabotka progressivnykh tekhnologii polucheniya i obrabotki metallov, splavov, poroshkovykh i kompozitsionnykh nanomaterialov* [Development of progressive technologies for obtaining and processing metals, alloys, powder and composite nanomaterials]. Tula, 2016, 235 p. (In Russ.).

15. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Mekhanizmy vodorodnogo rastreskivaniya metallov i splavov [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Part I (review). *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 3, pp. 27-33 (In Russ.).

16. Sergeev N. N., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов [Mechanisms of hydrogen cracking of metals and alloys]. Part II (review). *Materialovedenie = Materials Science*, 2018, no. 4, pp. 20-29 (In Russ.).

17. Sergeev N. N., Tereshin V. A., Chukanov A. N., Kolmakov A. G., Yakovenko A. A., Sergeev A. N., Leontiev I. M., Honelidze D. M., Gvozdev A. E. Formirovanie plasticheskikh zon okolo sfericheskoi polosti v uprochnennykh nizkouglerodistykh stalyakh v usloviyakh vodorodnoi stress-korrozii [Formation of plastic zones near a spherical cavity in hardened low-carbon steels under conditions of hydrogen stress corrosion]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2017, no. 12, pp. 18-25 (In Russ.).

18. Gvozdev A. E., Zhuravlev G. M., Kolmakov A. G. Formirovanie mekhanicheskikh svoystv uglerodistykh stalei v protsessakh vytyazhki s utoneniem [Formation of mechanical properties of carbon steels in the processes of drawing with thinning]. *Tekhnologiya metallov = Metal Technology*, 2015, no. 11, pp. 17-29 (In Russ.).

19. Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Provotorov D. A., Minaev I. V., Sergeev N. N., Tikhonova I. V. Vliyanie raznozernistosti austenita na kinetiku perlitnogo prevrashcheniya v malo- i sredneuglerodistykh nizkolegirovannykh stalyakh [Influence of different-grained austenite on the kinetics of perlite transformation in low-and medium-carbon low-alloy steels]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2014, no. 7, pp. 23-26 (In Russ.).

20. Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Minaev I. V., Tikhonova I. V., Kolmakov A. G. Rol' protsessa zarodysheobrazovaniya v razvitii nekotorykh fazovykh perekhodov vtorogo roda [The Role of the germ formation process in the development of some phase transitions of the second kind]. *Materialovedenie = Materials Science*, 2015, no. 1, pp. 15-21 (In Russ.).

21. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. E., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 126-129.

22. Gvozdev A. E., Sergeyev N. N., Minayev I. V., Tikhonova I. V., Sergeyev A. N., Khonelidze D. M., D Maliy. V., Golyshev I. V., Kolmakov A. G., Provotorov D. A. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 148-152.

23. Sergeev N. N., Kutepov S. N., Sergeev A. N., Kolmakov A. G., Izvolsky V. V., Gvozdev A. E. Dlitel'naya prochnost' armaturnoi stali 22Kh2G2AYu pri ispytaniyakh na korrozionnoe rastreskivanie v kipyashchem rastvore nitratov [Long-term strength of reinforcement steel 22X2G2A in tests for corrosion cracking in a boiling solution of nitrates]. *Deformatsiya i razrushenie materialov. = Deformation and Destruction of Materials*, 2019, no. 8, pp. 33-39 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Архипов Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: iarh@list.ru

Igor S. Arkhipov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Leading Researcher of the Technology and Service Department, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: iarh@list.ru

Абрамова Влада Игоревна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии и сервиса», ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: abramova_vi@mail.ru

V.I. Abramova, Cand of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of technology and service, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: abramova_vi@mail.ru

Гвоздев Александр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Aleksandr E. Gvozdev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Evgeniy V. Ageev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageev_ev@mail.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3862-8624>

Кутепов Сергей Николаевич, кандидат педагогических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого», Тула, Российская Федерация, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Sergey N. Kutepov, Cand of Sci. (Pedagogical), Professor, Tula State Pedagogical University named after Lev Tolstoy, Tula, Russian Federation, e-mail: kutepov.sergei@mail.ru

Антон Алексеевич Калинин, инженер, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Российская Федерация, e-mail: antony-ak@mail.ru

Anton A. Kalinin, Engineer, Tula State University, Tula, Russian Federation, e-mail: antony-ak@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-49-59>

Метод учёта влияния концевых шайб на обтекание крыла с изменяющимися по размаху профилями

Е.К. Галемин ¹, Е.В. Агеева ² ✉

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Калужский филиал
ул. Баженова 2, г. Калуга 248000, Российская Федерация

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Резюме

Целью исследования является разработка способа учёта влияния концевых шайб на обтекание крыльев с произвольным распределением профилей по размаху.

Методы. Установка концевых шайб существенно улучшает аэродинамику крыла, увеличивая подъёмную силу и уменьшая индуктивное сопротивление. Применена теория непрерывной вихревой поверхности для моделирования учёта влияния концевых шайб на обтекание объёмного крыла. В соответствии с ней косые подковообразные вихри, моделирующие верхнюю и нижнюю сторону крыла, непрерывно распределены по продольным панелям, на которые делится полуразмах крыла. Несущие части каждого подковообразного вихря лежат в плоскостях, параллельных плоскости хорд крыла и проходят через точки и среднего сечения той панели, в точке которой вычисляются вызванные скорости. Свободные вихри крыла сходят с его торцов с верхней и нижней поверхностей под углом к плоскости хорд.

Результаты. Разработан алгоритм расчёта интенсивности вихрей из условия непроницаемости с учётом присоединённых и свободных вихрей крыла и вихрей концевых шайб. Вихревые плотности, входящие в это условие, представляются тригонометрическими рядами. Разработанный метод учитывает геометрию профиля и концевых шайб, форму крыла в плане. Вихри индуцируют дополнительные скорости в точках поверхности крыла. Для вычисления их значений используется формула Био-Савара о вихревом влиянии.

Заключение. С единых позиций теории непрерывной вихревой поверхности разработан метод расчёта аэродинамических характеристик объёмного крыла с концевыми шайбами. В расчётах учитывается геометрия шайб и профиля, форма крыла в плане. Метод универсален и может быть применён для крыльев без шайб, в том числе и для тонких.

Ключевые слова: вихревая модель крыла; концевые шайбы; вызванная скорость.

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

Для цитирования: Галемин Е.К., Агеева Е.В. Метод учёта влияния концевых шайб на обтекание крыла с изменяющимися по размаху профилями // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 49-59. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-49-59>.

Поступила в редакцию 02.03.2020

Подписана в печать 30.03.2020

Опубликована 20.04.2020

Method for Accounting the Effect of End Washers on the Flow Around the Wing with Spanwise Profiles

Evgeniy K. Galemin ¹, Ekaterina V. Ageeva ² ✉

¹ Kaluga Branch "Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University)
2 Bazhenova str., Kaluga 248000, Russian Federation

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

✉ e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a method for accounting for the influence of end washers on the flow of wings with an arbitrary distribution of fillets over the span.

Methods. The installation of end washers significantly improves the aerodynamics of the wing, increasing lift and reducing inductive resistance. The theory of a continuous vortex surface is applied to simulate the effect of end washers on the flow of a volumetric wing. In accordance with it, oblique horseshoe-shaped vortices that model the upper and lower sides of the wing are continuously distributed along the longitudinal panels, into which the half-span of the wing is divided. The bearing parts of each horseshoe-shaped vortex lie in planes parallel to the plane of the wing chords and pass through the points and the middle section of the panel at which the induced velocities are calculated. The free vortices of the wing descend from its ends from the upper and lower surfaces at an angle to the plane of the chords.

Results. An algorithm has been developed for calculating the intensity of vortices from the non-permeability condition, taking into account the attached and free vortices of the wing and the end-washer vortices. The vortex densities included in this condition are represented by trigonometric series. The developed method takes into account the geometry of the profile and end washers, the shape of the wing in the plan. The vortices induce an additional velocity at the points on the surface of the wing. To calculate their values, the Biot-savard formula on vortex influence is used.

Conclusion. A method for calculating the aerodynamic characteristics of a volumetric wing with end washers has been developed from the unified positions of the theory of a continuous vortex surface. The calculations take into account the geometry of the washers and profile, the shape of the wing in the plan. The method is universal and can be used for wings without washers, including for thin ones.

Keywords: vortex wing model; end washers; evoked speed.

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

For citation: Galemin E.K. Method for Accounting the Effect of End Washers on the Flow Around the Wing with Spanwise Profiles // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 49-59 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-49-59>.

Received 02.03.2020

Accepted 30.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

Как известно, установка концевых шайб существенно улучшает аэродинамические характеристики крыла. В большей степени это улучшение прояв-

ляется для крыльев малых относительных удлинений. Препятствуя перетеканию потока с нижней стороны крыла на верхнюю и образованию вихрей на концах крыла, шайбы увеличивают

подъёмную силу и уменьшают индуктивное сопротивление. Использование этого положительного эффекта и появление первых конструкций шайб относится ещё к началу 1900-х годов. Большинство известных работ на эту тему посвящено экспериментальному исследованию влияния концевых шайб различной конструкции на аэродинамические характеристики крыла [1, 2, 3, 4]. Теоретическое развитие вопроса получил в работах Я.М. Курицкеса [5, 6] на основе гипотезы П-образных вихрей. Расчётные методы рассматриваются в работах [7–12]. В работе [13] при участии автора настоящей статьи решена задача расчёта АДХ для тонкого крыла с концевыми шайбами. В предлагаемой статье представлен метод учёта влияния концевых шайб на аэродинамику «толстого» крыла с распределёнными по размаху профилями.

Материалы и методы

Применена теория непрерывной вихревой поверхности для моделирования учёта влияния концевых шайб на обтекание объёмного крыла. Эта теория получила развитие в работах [13–20]. В соответствии с ней косые подковообразные вихри, моделирующие верхнюю и нижнюю сторону крыла, непрерывно распределены по n продольным панелям, на которые делится полуразмах крыла. Несущие части каждого подковообразного вихря лежат в плоскостях, параллельных плоскости хорд крыла, и

проходят через точки M и M' среднего сечения той панели, в точке A которой вычисляются вызванные скорости (рис. 1). Свободные вихри крыла сходят с его торцов с верхней (в) и нижней (н) поверхностей под углом α к плоскости хорд [16].

Принимается, что интенсивность каждого вихря γ по всей длине одинакова. По хорде i -й панели в зависимости от координаты x интенсивности вихрей представляются в виде [16]:

$$\gamma_i^v \bar{a}_i \cos \chi dx \text{ и } \gamma_i^n \bar{a}_i \cos \chi dx ,$$

где $\bar{a}_i = \frac{b_i}{b_0}$ – обратное сужение крыла в

средних сечениях i -х панелей; b_i и b_0 – хорды в средних сечениях панелей и корневая.

Шайбы, как и крыло, представляются вихревыми поверхностями. Присоединённые вихри крыла переходят на шайбу параллельно оси Oy , а затем сходят с верхнего (в) и нижнего (н) краёв шайбы как свободные под углом α к плоскости хорд. Координаты точек схода вихрей для левой шайбы обозначим:

y_L^v – для верхнего края; y_L^n – для нижнего края. Аналогично для правой шайбы: y_{II}^v и y_{II}^n . Эти вихри индуцируют

дополнительные скорости в точках поверхности крыла. Для вычисления их значений используется формула Био-Савара о вихревом влиянии.

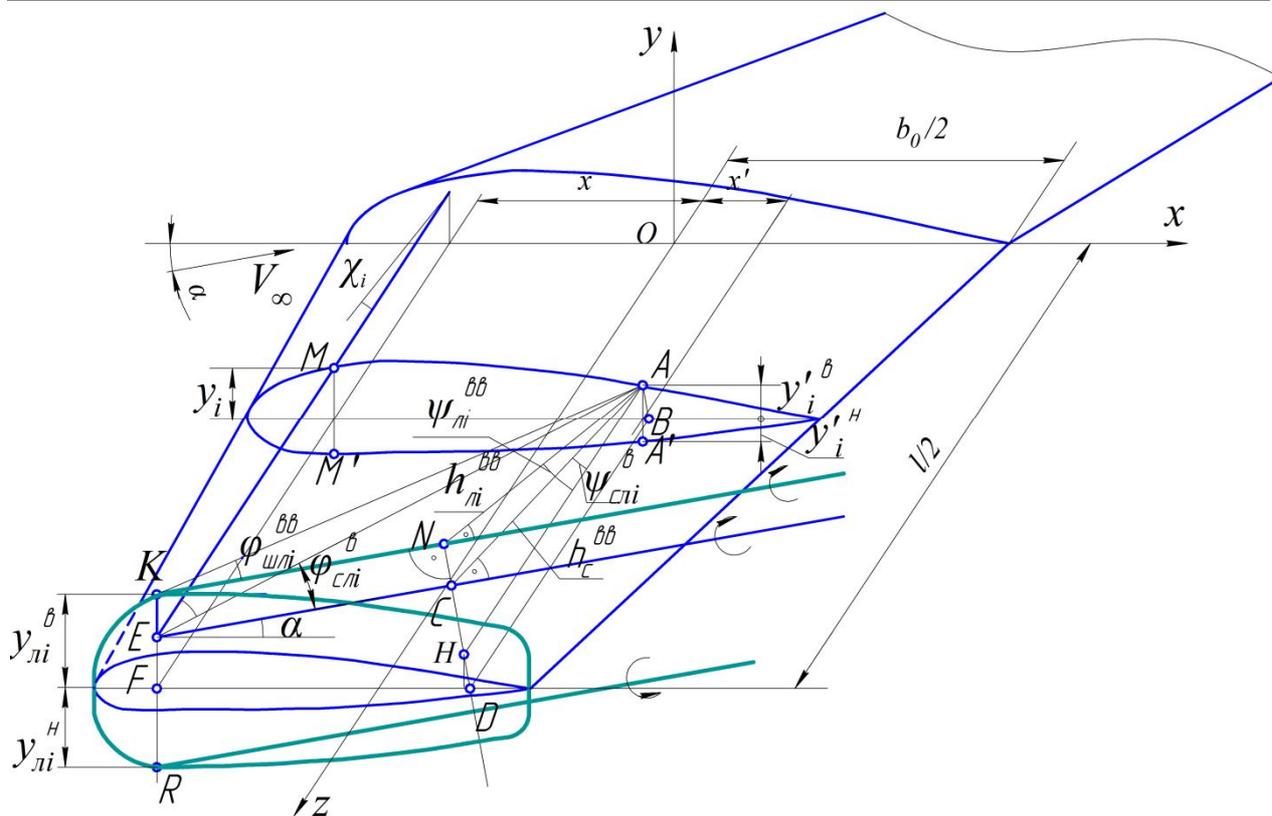


Рис. 1. Схема к вычислению вызванных скоростей

Fig. 1. Scheme for calculating the induced speeds

Результаты и их обсуждение

Для скорости в точке A на верхней (в) стороне крыла, вызванной сходящим с верхней стороны левой (л) шайбы свободным вихрем, можно записать:

$$dW_{li}^{66} = \frac{\gamma_i^6 dx}{4\pi h_{li}^{66}} (1 + \cos \varphi_{li}^{66}). \quad (1)$$

Здесь h_{li}^{66} – расстояние от точки A до оси свободного вихря (рис. 1).

Введём относительные координаты: θ – для луча, на котором располагается несущий вихрь, и θ' – для луча, проходящего через расчётную точку (A).

$$\cos \theta = -\frac{x}{b_0/2}, \quad \cos \theta' = -\frac{x'}{b_0/2}.$$

Относительные величины:

$$\lambda^* = \frac{l}{b_0}, \quad \lambda_n = \frac{l}{b_0 n}, \quad \bar{y} = \frac{y}{b_0/2},$$

$$\bar{h} = \frac{h}{b_0/2}, \quad \bar{\gamma} = \frac{\gamma}{V_\infty}, \quad \bar{W} = \frac{W}{V_\infty}, \quad \bar{V} = \frac{V}{V_\infty}.$$

В безразмерном виде проекции скорости \bar{W}_{li}^{66} на оси координат получим, проинтегрировав (1) по длине шайбы:

$$\bar{W}_{lix}^{66} = \frac{\bar{a}_i \sin \alpha}{4\pi} \int_0^\pi \bar{\gamma}_i^6 \frac{1 + \cos \varphi_{li}^{66}}{h_{li}^{66}} \times$$

$$\times \cos \psi_{li}^{66} \cos \chi \sin \theta d\theta.$$

$$\bar{W}_{liy}^{66} = -\bar{W}_{lix}^{66} \operatorname{ctg} \alpha;$$

$$\cos \varphi_{uui}^{66} = \frac{ON}{OA};$$

$$\bar{W}_{liz}^{66} = \frac{\bar{a}_i}{4\pi} \int_0^{\bar{\gamma}_i} \frac{1 + \cos \varphi_{li}^{66}}{h_{li}^{66}} \times$$

$$\cos \psi_{uui}^{66} = \frac{AH}{AN};$$

$$\times \sin \psi_{li}^{66} \cos \chi \sin \theta d\theta.$$

$$\sin \psi_{uui}^{66} = \frac{HN}{AN}.$$

Из рис. 1: $h_{li}^{66} = AN = \sqrt{NH^2 + AH^2};$

В относительных координатах после преобразований получим:

$$\bar{h}_{uui}^{66} = \sqrt{\left(\bar{F}\bar{D}_i^6 \sin \alpha + \bar{y}_i^6 \cos \alpha - \frac{\bar{y}_i'}{\cos \alpha} \right)^2 + \left[\lambda^* - (i+0.5)\lambda_n \right]^2};$$

$$\cos \varphi_{uui}^{66} = \frac{\bar{F}\bar{D}_i^6 \cos \alpha - \bar{y}_i^6 \sin \alpha}{\sqrt{\left(\bar{h}_{uui}^{66} \right)^2 + \left(\bar{F}\bar{D}_i^6 \cos \alpha + \bar{y}_i^6 \sin \alpha \right)^2}};$$

$$\sin \psi_{li}^{66} = \frac{\bar{F}\bar{D}_i^6 \sin \alpha + \bar{y}_i^6 \cos \alpha - \frac{\bar{y}_i'}{\cos \alpha}}{\bar{h}_{li}^{66}};$$

$$\bar{F}\bar{D}_i^6 = (\cos \theta - \cos \theta') \bar{a}_i - \left[\lambda^* - (i+0.5)\lambda_n \right] \operatorname{tg} \chi + \bar{y}_i' \operatorname{tg} \alpha.$$

Аналогично рассчитываются проекции скоростей, вызванных в точке A верхней поверхности крыла вихрями, сходящими с нижнего края левой шайбы (\bar{W}_{li}^{H6}) и вихрями правой шайбы (\bar{W}_{pi}^{66}) и (\bar{W}_{pi}^{H6}).

Полные проекции скорости, вызванной вихревой системой шайб в расчётной точке A среднего сечения i -й панели верхней поверхности крыла:

$$\bar{W}_{ix}^6 = \bar{W}_{lix}^{66} + \bar{W}_{lix}^{H6} + \bar{W}_{pix}^{66} + \bar{W}_{pix}^{H6};$$

$$\bar{W}_{iy}^6 = \bar{W}_{liy}^{66} + \bar{W}_{liy}^{H6} + \bar{W}_{piy}^{66} + \bar{W}_{piy}^{H6};$$

$$\bar{W}_{iz}^6 = \bar{W}_{liz}^{66} + \bar{W}_{liz}^{H6} + \bar{W}_{piz}^{66} + \bar{W}_{piz}^{H6}.$$

Проекция скорости, вызванной вихревой системой шайб в точке A' на нижней поверхности крыла ($\bar{W}_{ix}^H, \bar{W}_{iy}^H, \bar{W}_{iz}^H$), рассчитываются аналогично.

Интегральные уравнения непроницаемости

Условия непроницаемости в точках средних сечений панелей для верхней и нижней поверхностей крыла с координатой θ' запишем в виде:

$$\begin{aligned} & \left(\bar{W}_{ix}^6 + \bar{V}_{pix}^6 + \bar{V}_{cix}^6 \right) \cos \alpha_{mi}^6 + \\ & + \left(\bar{W}_{iy}^6 + \bar{V}_{piy}^6 + \bar{V}_{ciy}^6 \right) \sin \alpha_{mi}^6 = \\ & = \cos \left(\alpha_{mi}^6 - \alpha \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\bar{W}_{ix}^H + \bar{V}_{pix}^H + \bar{V}_{cix}^H \right) \cos \alpha_{mi}^H + \\ & + \left(\bar{W}_{iy}^H + \bar{V}_{piy}^H + \bar{V}_{ciy}^H \right) \sin \alpha_{mi}^H = \\ & = \cos \left(\alpha_{mi}^H - \alpha \right). \end{aligned}$$

Здесь $\bar{V}_{pi}^6, \bar{V}_{ci}^6, \bar{V}_{pi}^H, \bar{V}_{ci}^H$ – скорости, вызванные присоединёнными и свободными вихрями верхней и нижней поверхностей крыла в точках A и A' , рассчитываются по методике [16]; α_{mi}^6 и

α_{mi}^n – углы между нормальными к контурам средних сечений i -х панелей верхней и нижней поверхностей крыла и плоскостью Oxz (рис. 2).

Проекции скоростей в уравнениях непроницаемости являются функциями вихревых плотностей $\bar{\gamma}_i^e(\theta)$ и $\bar{\gamma}_i^n(\theta)$.

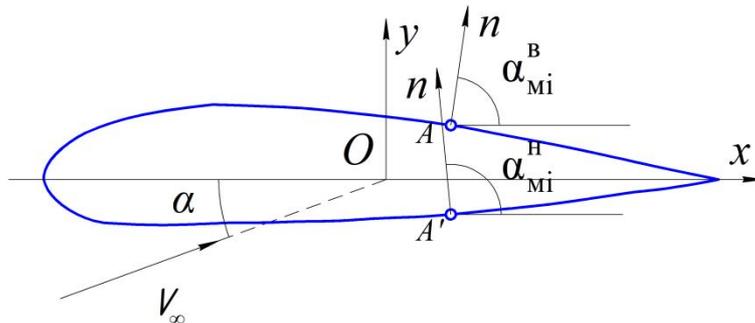


Рис. 2. Местные углы наклона элементов поверхности профиля к плоскости Oxz

Fig. 2. The local tilt angles of the surface elements of the profile to the plane Oxz

Выразим вызванные скорости в уравнениях непроницаемости через эти ряды. Получим систему алгебраических уравнений относительно коэффициентов A_{qi} и B_{qi} :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{q=0}^p C_{qi}^{e6} A_{qi} + \sum_{q=0}^p K_{qi}^{ne6} &= \cos[\alpha_{mi}^e(\theta') - \alpha]; \\ \sum_{q=0}^p C_{qi}^{n6} A_{qi} + \sum_{q=0}^p K_{qi}^{nn6} &= \cos[\alpha_{mi}^n(\theta') - \alpha]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь C_{qi}^{e6} , C_{qi}^{n6} , K_{qi}^{ne6} , K_{qi}^{nn6} – элементы матрицы в выражениях для скоростей, вызванных на верхней и нижней поверхностях крыла.

Решив систему (2), найдём коэффициенты A_{qi} и B_{qi} , и, следовательно, распределение вихревой плотности $\bar{\gamma}_i^e$ и $\bar{\gamma}_i^n$.

Для вычисления аэродинамических характеристик может быть применена методика, использованная в работе [6]

Представим $\bar{\gamma}_i^e(\theta)$ и $\bar{\gamma}_i^n(\theta)$ тригонометрическими рядами. Этот метод применён в работах [13-20] и других.

$$\bar{\gamma}_i^e(\theta) = 2 \left(A_{0i} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} + \sum_{q=1}^p A_{qi} \sin q\theta \right),$$

$$\bar{\gamma}_i^n(\theta) = 2 \left(B_{0i} \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} + \sum_{q=1}^p B_{qi} \sin q\theta \right).$$

для крыла без шайб. Коэффициенты давления в точках верхней и нижней поверхностей крыла найдём в виде:

$$C_{pi}^e = 1 - (W_{\tau i}^e)^2;$$

$$C_{pi}^n = 1 - (W_{\tau i}^n)^2.$$

Здесь $W_{\tau i}^e$ и $W_{\tau i}^n$ – скорости, касательные к верхней и нижней поверхностям крыла в точках средних сечений панелей. При их вычислении принимается, что скорости собственной индукции $\frac{\gamma}{2}$ направлены перпендикулярно к осям вихрей и касательно поверхности крыла.

$$\bar{W}_{\tau i}^e = \left\{ \left[\sin(\alpha_{mi}^e - \alpha) + (\bar{W}_{ix}^e + \bar{V}_{nix}^e + \bar{V}_{cix}^e) \sin \alpha_{mi}^e + \frac{\gamma_i^e}{2} \cos \chi - (\bar{W}_{ix}^e + \bar{V}_{nix}^e + \bar{V}_{cix}^e) \cos \alpha_{mi}^e \right]^2 + \left(\bar{W}_{iz}^e + \bar{V}_{niz}^e + \bar{V}_{ciz}^e - \frac{\gamma_i^e}{2} \sin \chi \right)^2 \right\}^{1/2};$$

$$\bar{W}_{vi}^n = \left\{ \left[\sin(\alpha_{mi}^n - \alpha) + (\bar{W}_{ix}^n + \bar{V}_{nix}^n + \bar{V}_{cix}^n) \sin \alpha_{mi}^n + \frac{\gamma_i^n}{2} \cos \chi - (\bar{W}_{ix}^n + \bar{V}_{nix}^n + \bar{V}_{cix}^n) \cos \alpha_{mi}^n \right]^2 + \left(\bar{W}_{iz}^n + \bar{V}_{niz}^n + \bar{V}_{ciz}^n - \frac{\gamma_i^n}{2} \sin \chi \right)^2 \right\}^{1/2}.$$

Выводы

С единых позиций теории непрерывной вихревой поверхности разработан метод расчёта аэродинамических характеристик объёмного крыла с концевыми шайбами. В расчётах учитывается геометрия шайб и профиля, форма крыла в плане. Метод универсален и может быть применён для крыльев без шайб, в том числе и для тонких.

Список литературы

1. Визель Е.П. Исследование свободных вихрей крыла малого удлинения с концевыми шайбами вблизи экрана // Учёные записки ЦАГИ. 1971. Т.2. № 3. С. 12-19.
2. Чичеров Н.А. Экспериментальные исследования распределения давления на крыле с концевыми шайбами при околосвуковых скоростях // Учёные записки ЦАГИ. 1986. Т.17. № 3. С. 90-94.
3. Шмигирилов А.Н. Влияние концевых шайб на поперечное обтекание прямоугольной пластины малого удлинения // Естественные и математические науки в современном мире. 2015. № 30. С. 158-162.
4. Бурцев Б.Н., Вожаев Е.С., Головкин М.А., Головкина Е.В., Горбань В.П. Влияние на аэродинамику крыла и несущего винта установки небольших концевых крылышек // Учёные записки ЦАГИ. 2005. Т.36. № 3-4. С. 51-58.
5. Курицкес Я.М. Теория крыльев с концевыми шайбами при гипотезе П-образных вихрей. М.: Изд-во ВВА им. Н.Е. Жуковского, 1947.
6. Курицкес Я.М. Вихревая теория крыла с концевыми симметричными по высоте шайбами. М.: Изд-во ВВА им. Н.Е. Жуковского, 1948.
7. Гуереш Дж., Попов С.А., Рыжов Ю.А. К определению формы и размеров законцовки крыла дозвукового пассажирского самолёта // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 3. С. 14-21.
8. Москаленко В.О., Цой А.И., Недогарок А.А. Исследование аэродинамических характеристик крыла с законцовками различной формы // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 10 (94). С.3.
9. Павленко О.В., Раздобарин А.М., Федоренко Г.А. Влияние формы законцовки на обтекание крыла // Учёные записки ЦАГИ. 2018. Т.49. № 3. С. 26-35.

10. Гуереш Д., Попов С.А. Улучшение аэродинамики крыла пассажирского самолёта с помощью законцовки треугольной формы в плане // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 1. С. 124-136.
11. Средства снижения индуктивного сопротивления крыла самолёта / Л.Л. Теперин, Т.М. Притуло, Ф.Э. Орфинежад, Т. Мьё // Труды МФТИ. 2017. Т. 9. № 4 (36). С. 94-105.
12. Кара А., Кривохатько И.С., Сухов В.В. Оценка эффективности управляемой концевой аэродинамической поверхности крыла // Механіка гіроскопічних систем. 2014. № 28. С. 108-117.
13. Пастухов А.И., Галемин Е.К. К расчету аэрогидродинамических характеристик крыльев с концевыми шайбами в несжимаемом потоке // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2004. № 1. С. 20-31.
14. Пастухов А.И., Галемин Е.К. Приближённый метод расчёта обтекания телесных крыльев малого удлинения на основе нелинейной теории непрерывной вихревой поверхности // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 1991. № 1. С. 55-60.
15. Пастухов А.И. Вихревое математическое моделирование обтекания тел потоком сплошной среды. Вып. 2. Нелинейная вихревая теория несущей поверхности. М.: Изд-во МГТУ, 1994. 66 с.
16. Пастухов А.И., Галемин Е.К. К расчету аэродинамических характеристик крыльев с изменяющимися по размаху профилями в несжимаемом потоке // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2001. № 4. С. 72-83.
17. Пастухов А.И., Галемин Е.К. К расчёту аэродинамических характеристик тонких крыльев с постоянной по размаху стреловидностью в несжимаемом потоке вблизи экрана // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Серия: Машиностроение. 2006. №2. С. 3-17.
18. Пастухов А.И., Галемин Е.К. К задаче о крыле, движущемся вблизи экранирующей поверхности // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2007. № 2 (67). С. 3-8.
19. Галемин Е.К. Моделирование обтекания объемного крыла у экрана // Науковедение: интернет-журнал. 2017. Т. 9. № 2. С. 60.
20. Галемин Е.К., Агеева Е.В. Учёт влияния корпуса на обтекание крыла // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, №1. С. 21-30.

References

1. Wiesel E.P. Issledovanie svobodnykh vikhrei kryla malogo udlineniya s kontsevymi shaibami vblizi ekrana [Study of free vortices of a wing of small elongation with end washers near the screen]. *Uchenye zapiski TsAGI = Scientific Notes TsAGI*, 1971, vol.2, no. 3, pp. 12-19 (In Russ.).
2. Chicherov N.A. Eksperimental'nye issledovaniya raspredeleniya davleniya na kryle s kontsevymi shaibami pri okolozvukovykh skorostyakh [Experimental studies of the pressure distribution on the wing with end washers at transonic speeds]. *Uchenye zapiski TsAGI = Scientific Notes TsAGI*, 1986, vol.17, no. 3, pp. 90-94 (In Russ.).
3. Shmigirilov A.N. Vliyanie kontsevykh shaib na poperechnoe obtekanie pryamougol'noi plastiny malogo udlineniya [The influence of end washers on the transverse flow around a rectangular plate of small elongation]. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire = Natural and Mathematical Sciences in the Modern World*, 2015, no. 30, pp. 158-162 (In Russ.).
4. Burtsev B.N., Vozhdaev E.S., Golovkin M.A., Golovkina E.V., Gorban V.P. Vliyanie na aerodinamiku kryla i nesushchego vinta ustanovki nebol'shikh kontsevykh krylyshek [Influence on the aerodynamics of the wing and the rotor of the installation of small-sized end wings]. *Uchenye zapiski TsAGI = Scientific Notes TsAGI*, 2005, vol. 36, no. 3-4, pp. 51-58 (In Russ.).
5. Kuritskes Ya.M. *Teoriya kryl'ev s kontsevymi shaibami pri gipoteze P-obraznykh vikhrei* [Theory of wings with end washers under the hypothesis of U-shaped vortices]. Moscow, VVA im. N.E. Zhukovskogo Publ., 1947 (In Russ.).
6. Kuritskes Y.M. *Vikhrevaya teoriya kryla s kontsevymi simmetrichnymi po vysote shaibami* [The vortex theory of a wing with end washers symmetrical in height]. Moscow, VVA im. N.E. Zhukovskogo Publ., 1948 (In Russ.).
7. Gueresh J., Popov S.A., Ryzhov Yu.A. K opredeleniyu formy i razmerov zakon'tsovki kryla dozvukovogo passazhirskogo samoleta [To determine the shape and size of the wingtip of a subsonic passenger aircraft]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviat'sionnaya tekhnika = News of Higher Educational Institutions. Aircraft Technology*, 2018, no. 3, pp. 14-21 (In Russ.).
8. Moskalenko V.O., Tsoi A.I., Nedogarok A.A. Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik kryla s zakon'tsovkami razlichnoi formy [The study of the aerodynamic characteristics of the wing with wingtips of various shapes]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, no 10 (94), 3 p. (In Russ.).
9. Pavlenko O.V., Razdobarin A.M., Fedorenko G.A. Vliyanie formy zakon'tsovki na obtekanie kryla [Effect of wingtip shape on wing flow]. *Uchenye zapiski TsAGI = Scientific Notes TsAGI*, 2018, vol. 49, no. 3, pp. 26-35 (In Russ.).

10. Goueresh D., Popov S.A. Uluchshenie aerodinamiki kryla passazhirskogo samoleta s pomoshch'yu zakontsovki treugol'noi formy v plane [Improving the aerodynamics of the wing of a Pass-fat plane using a triangular-shaped ending in plan]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 124-136 (In Russ.).

11. Teperin L. L., Pritulo T. M., Orfinejad F. E., Myo T. Sredstva snizheniya induktivnogo soprotivleniya kryla samoleta [Means of reducing the inductive resistance of an aircraft wing]. *Trudy MFTI = Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology*, 2017, vol. 9, no. 4 (36), pp. 94-105 (In Russ.).

12. Kara A., Krivokhatko I.S., Sukhov V.V. Otsenka effektivnosti upravlyaemoi kontsevoi aerodinamicheskoi poverkhnosti kryla [Assessment of the effectiveness of the controlled end wing aerodynamic surface]. *Mekhanika giroskopichnikh sistem = Mechanics of Gyroscopic Systems*, 2014, no. 28, pp. 108-117 (In Russ.).

13. Pastukhov A.I., Galemin E.K. K raschetu aerogidrodinamicheskikh kha-rakteristik kryl'ev s kontsevymi shaibami v neszhimaemom potoke [To the calculation of the aerodynamic characteristics of wings with end washers in an incompressible flow]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series: Engineering*, 2004, no. 1, pp. 20-31 (In Russ.).

14. Pastukhov A.I., Galemin E.K. Priblizhennyi metod rascheta obtekaniya telesnykh kryl'ev malogo udlineniya na osnove nelineinoi teorii nepreryvnoi vikhrevoi poverkhnosti [An approximate method for calculating the body wings of small elongation based on the nonlinear theory of a continuous vortex surface]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Series: Engineering*, 1991, no. 1, pp. 55-60 (In Russ.).

15. Pastukhov A.I. *Vikhrevoe matematicheskoe modelirovanie obtekaniya tel potokom sploshnoi sredy. Vyp. 2. Nelineinaya vikhrevaya teoriya nesushchei poverkhnosti* [Vortex mathematical modeling of the flow of bodies around a stream of a continuous medium. Non-linear vortex theory of the bearing surface]. Moscow, *MGTU Publ.*, 1994, 66 p. (In Russ.).

16. Pastukhov A.I., Galemin E.K. K raschetu aerodinamicheskikh kharakteristik kryl'ev s izmenyayushchimisya po razmakhu profilyami v neszhimaemom potoke [To the calculation of the aerodynamic characteristics of wings with variable profiles in an incompressible flow]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series: Engineering*, 2001, no. 4, pp. 72-83 (In Russ.).

17. Pastukhov A.I., Galemin E.K. K raschetu aerodinamicheskikh kharakteristik tonkikh kryl'ev s postoyannoi po razmakhu strelovidnost'yu v neszhimaemom potoke vblizi ekrana [To the calculation of the aerodynamic characteristics of thin wings with constant

sweep sweep in an incompressible stream near the screen]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroenie = Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Series: Engineering*, 2006, no 2, pp. 3-17 (In Russ.).

18. Pastukhov A.I., Galemin E.K. K zadache o kryle, dvizhushchemsya vblizi ekraniruyushchei poverkhnosti [To the problem of a wing moving near a shielding surface]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series: Engineering*. 2007, no. 2 (67), pp. 3-8 (In Russ.).

19. Galemin E.K. Modelirovanie obtekaniya ob"emnogo kryla u ekrana [Modeling the flow around a volume wing near a screen]. *Naukovedenie: internet-zhurnal = Science of Science: Internet Journal*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 60 (In Russ.).

20. Galemin E.K., Ageeva E.V. Uchet vliyaniya korpusa na obtekanie kryla [Shape Influence on Wing Flow]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 21-30 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Галемин Евгений Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга, Российская Федерация, e-mail: ekgalemin@mail.ru

Evgeniy K. Galemin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Kaluga Branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (National Research University), Kaluga, Russian Federation, e-mail: ekgalemin@mail.ru

Агеева Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии материалов и транспорта, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Ekaterina V. Ageeva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials and Transport Technology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Комплексное восстановление работоспособного технического состояния несущей кирпичной кладки, имеющей физический износ

С.В. Дубраков ¹ ✉, К.О. Дубракова ¹, А.В. Масалов ¹,

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: sirius080993@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Обследование и оценка технического состояния ограждающих конструкций жилого дома, расположенного по адресу ул. Энгельса, д. 107 в г. Курске.

Методы. Обследование технического состояния зданий и сооружений необходимо для определения остаточного ресурса и срока службы строительных конструкций зданий и сооружений. Действующие нормативные документы требуют проведения обследования технического состояния зданий и сооружений не позднее чем через два года после их ввода в эксплуатацию. В дальнейшем обследование технического состояния зданий и сооружений проводится не реже одного раза в 10 лет и не реже одного раза в пять лет для зданий и сооружений или их отдельных элементов, работающих в неблагоприятных условиях (агрессивные среды, вибрации, повышенная влажность, сейсмичность района 7 баллов и более и др.). Для уникальных зданий и сооружений устанавливается постоянный режим мониторинга.

Результаты. В процессе обследования жилого дома, расположенного по адресу ул. Энгельса, д. 107, были решены следующие задачи: определение поврежденных ограждающих конструкций; анализ результатов исследования степени износа строительных конструкций здания; выполнение предложений по усилению кирпичной кладки. Для устранения вышеперечисленных повреждений было разработано предложение по увеличению жёсткости надфундаментной части здания, предварительно исключив замачивание грунта фундамента: отремонтировав отмостку и сети отопления, водопровода и канализации.

Заключение. Решение узкой задачи по усилению отдельных конструкций зданий и сооружений может не дать должного результата, поэтому при обследовании необходимо рассматривать имеющиеся дефекты и повреждения в комплексе. В рамках данной работы рассмотрено усиление несущих стен жилого дома с увеличением общей жёсткости надфундаментной части здания и устранения отдельных повреждений.

Ключевые слова: усиление; обследование; физический износ; увеличение жёсткости здания; техническое состояние.

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

Для цитирования: Дубраков С.В., Дубракова К.О., Масалов А.В. Комплексное восстановление работоспособного технического состояния несущей кирпичной кладки, имеющей физический износ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 60-72. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-60-72>.

Поступила в редакцию 12.02.2020

Подписана в печать 06.04.2020

Опубликована 20.04.2020

Comprehensive Restoration of an Efficient Technical Condition of the Bearing Brickwork, Having Physical Wear

Sergey V. Dubrakov¹, Kseniya O. Dubrakova¹, Aleksandr V. Masalov¹

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

✉ e-mail: sirius080993@yandex.ru

Abstract

Purpose of research. Inspection and assessment of the technical condition of the enclosing structures of a residential building located at st. Engelsa, 107 in Kursk were carried out in connection with the development of the reinforcement project.

Methods. Inspection of the technical condition of buildings and structures is necessary to determine the residual resource and service life of the building structures. The current regulatory documents require an examination of the technical condition of buildings and structures no later than two years after their commissioning. In the future, the inspection of the technical condition of buildings and structures is carried out at least once every 10 years and at least once every five years for buildings and structures or their individual elements operating in adverse conditions (aggressive environments, vibrations, high humidity, seismicity of the area 7 points and more, etc.). A permanent monitoring regime is established for unique buildings and structures.

Results. In the process of examining a residential building located at st. Engelsa, 107, the following tasks have been solved: determination of damage to enclosing structures; analysis of the results of the study of the degree of wear of building structures; implementation of proposals for strengthening the brickwork. To eliminate the above damages, a proposal was developed to increase the rigidity of the above-foundation part of the building, having previously excluded soaking the foundation soil: by repairing the blind area and heating, water supply and sewerage networks.

Conclusion. The solution of a narrow task of strengthening individual structures of buildings and structures may not give the desired result, therefore, when performing inspection work, it is necessary to consider the existing defects and damage in the complex. Within the framework of this work, we consider the strengthening of the load-bearing walls of a residential building with an increase in the overall rigidity of the above-foundation part of the building and the elimination of individual damages.

Keywords: strengthening; examination; physical deterioration; increasing the rigidity of the building; technical condition.

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

For citation: Dobrakov S. V., Dubrakova K. O., Masalov A. V. Comprehensive Restoration of an Efficient Technical Condition of the Bearing Brickwork, Having Physical Wear. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 60-72 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-60-72>.

Received 12.02.2020

Accepted 06.04.2020

Published 20.04.2020

Введение

Обследование технического состояния зданий и сооружений необходимо для определения остаточного ресурса и срока службы строительных конструкций зданий и сооружений¹. Действующие нормативные требования, для зданий и сооружений, введенных в эксплуатацию, требуют проведения технического обследования не реже одного раза в пять лет².

В процессе обследования жилого дома, расположенного по адресу ул. Энгельса, д. 107, были решены следующие задачи:

- определение повреждений ограждающих конструкций;
- анализ результатов исследования степени износа строительных конструкций здания;
- выполнение предложений по усилению кирпичной кладки.

Материалы и методы

При обследовании здания [1-5] было выявлено:

- На фасадной части здания со стороны ул. Энгельса имеются множественные трещины, пересекающие от

1 до 5 рядов кладки в местах простенков и опирания оконных перемычек. На цокольной части здания штукатурный слой частично разрушен вследствие постоянного замачивания и размораживания. В районе 5 этажа на уличном фасаде на отметках пятого этажа (второй подъезд) наблюдается незначительное разрушение лицевой стороны кирпичной кладки в следствие размораживания и постоянного замачивания участка со стороны кровли из-за протечек кровли.

– На фасадной части здания со стороны дворовой территории на лестничной клетке имеется сквозная трещина с раскрытием в верхней части до 30 мм, появление трещины отмечено на отметке второго этажа.

После проведения визуального и инструментального обследования [6-8] можно сделать вывод о том, что конструкции здания находятся в работоспособном и ограниченно работоспособном состоянии согласно СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений». Поврежденность средняя. Существующие повреждения свидетельствуют о снижении несущей способности кирпичной кладки. Для продолжения нормальной эксплуатации кирпичной кладки требуется ремонт и усиление.

Участки с разрушенным штукатурным покрытием в цокольной части необходимо восстановить (рис. 1).

По периметру здания необходимо восстановить полноценную отмостку (рис. 2).

¹ СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2004.

² ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014.



Рис.1. Замачивание и частичное разрушение штукатурного слоя цокольной части здания

Fig. 1. Soaking and local destruction of the plaster layer on the building basement



Рис.2. Замачивание и частичное разрушение штукатурного слоя цокольной части здания.

Частичное разрушение отмостки

Fig. 2. Soaking and local destruction of the plaster layer on the building basement.

Local destruction of the blind area

Необходимо выполнить капитальный ремонт кровельного покрытия с восстановлением линий водостока. Для

предотвращения замачивания кирпичной кладки необходимо выполнить организованный водосток (рис. 3).



Рис.3. Замачивание железобетонных плит, выветривание цементно-песчаного раствора, разрушение лицевой стороны кирпичной кладки на толщину менее 15 % толщины

Fig. 3. Soaking of the reinforced concrete slabs, weathering of mortar. Destruction of the front side of the masonry less than 15 % of its thickness

Результаты и их обсуждение

Для устранения вышеперечисленных повреждений [9-20] следует выполнить работы по увеличению жёсткости надфундаментной части здания (рис. 4,5). Предварительно исключить

замачивание грунта фундамента: отремонтировать отмостку и сети отопления, водопровода и канализации.

Обтянуть здание бандажом по контуру в уровнях покрытия шестого этажа и перекрытия пятого этажа.

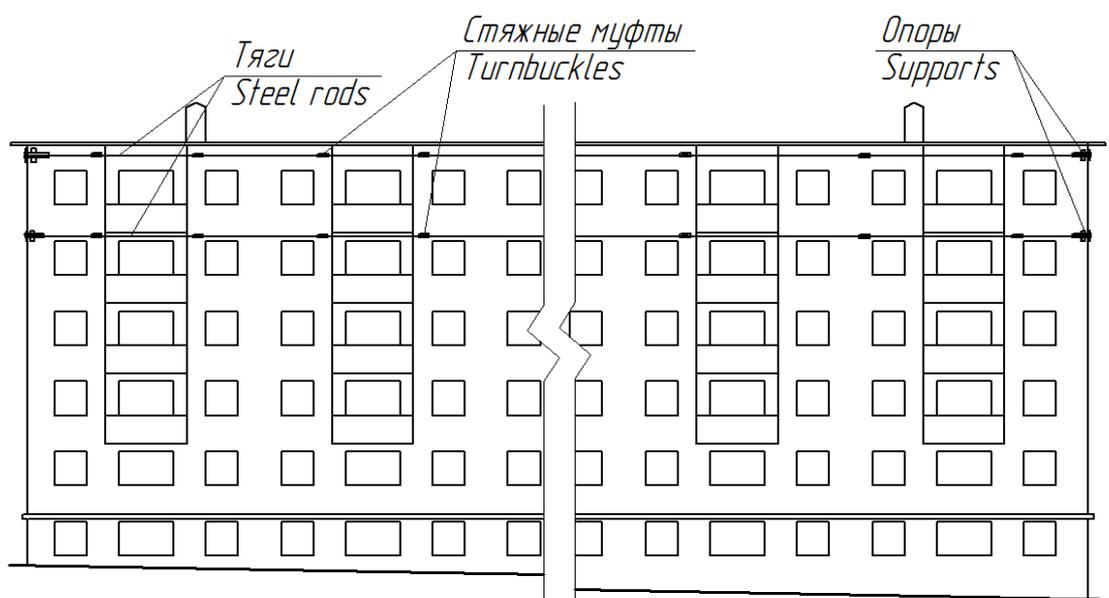


Рис.4. Схема расположения элементов усиления надфундаментной части здания. Уличный фасад

Fig. 4. Layout of reinforcement elements for the above-foundation part of the building. Street facade

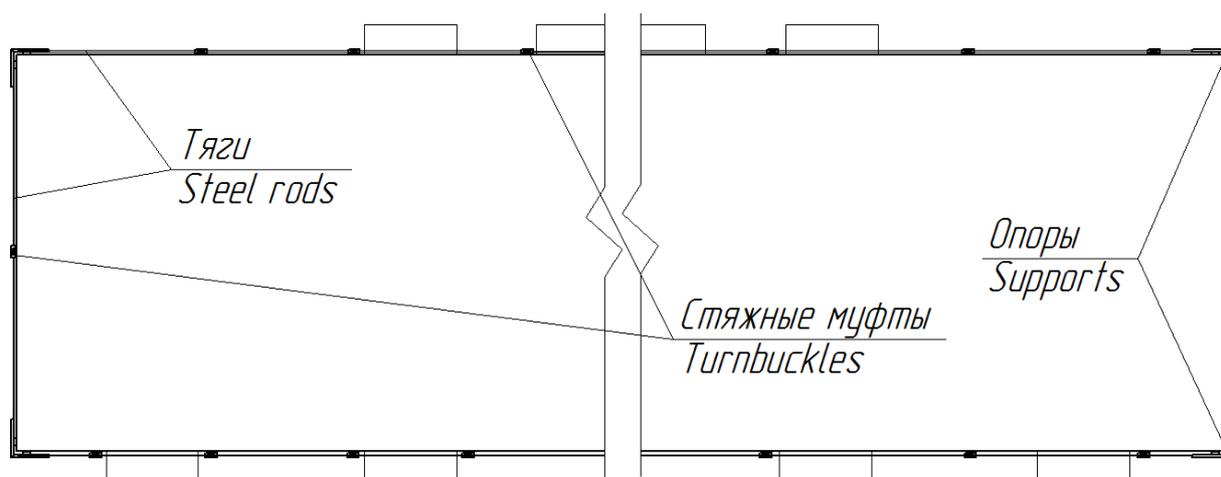


Рис.5. Схема расположения элементов усиления надфундаментной части здания ниже карнизных плит

Fig. 5. Reinforcement element layout of the building above-foundation part below the cornice slabs

Тяги изготовить из стержневой арматуры А240, диаметром 28 мм. Тяги опереть на штыревые опоры, установленные в каменную кладку с шагом не более 2 м.

На углах здания смонтировать угловые опоры на цементно-песчаный раствор М100 с помощью анкеров, установленных в кладке. Тяги приварить к угловым опорам по месту.

Натяжение тяг производить стяжными муфтами. Возможно использова-

ние покупных талрепов М30 либо изготовление стяжных муфт согласно схемам (рис.6). Талрепы (стяжные муфты) установить с шагом не более 6 м. Шпильки талрепов или изготовленных стяжных муфт приварить к тягам по месту.

Натяжение производить рычагом с плечом 1,5 м с усилием на конце рычага 30-40 кгс. Натяжение считают достаточным, если тяга не имеет провиса и при простукивании издаёт чистый звук высокого тона [7].

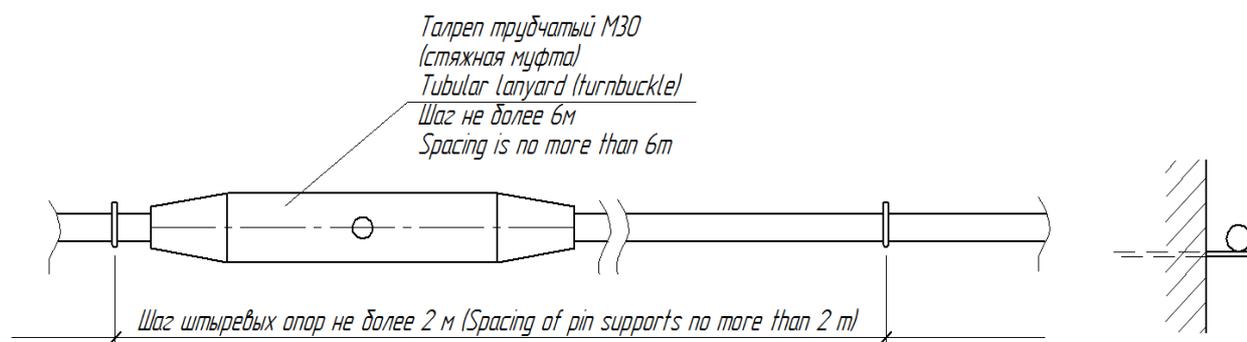


Рис. 6. Схема расстановки стяжных муфт и штыревых опор

Fig. 6. The scheme of the turnbuckle arrangement and pin supports

H1-Pш ГОСТ 14098-91

Weld type designation according to Russian standard

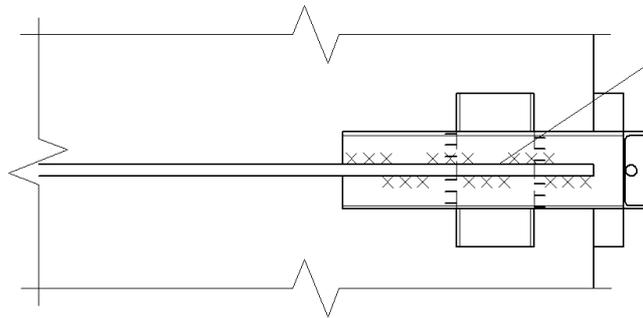


Рис. 7. Схема установки угловой опоры

Fig. 7. The scheme of installation of the corner supports

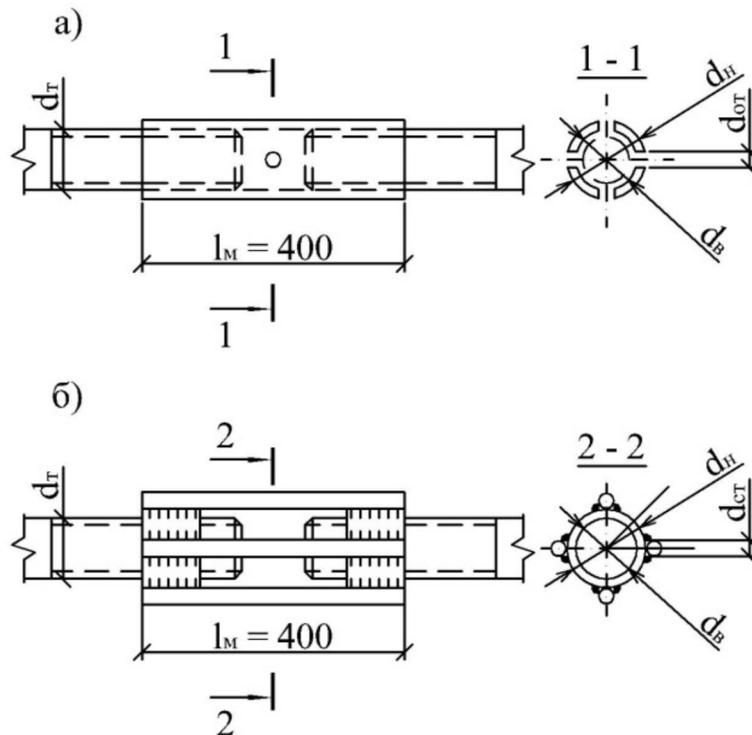


Рис.8. Конструктивные решения стяжных муфт: **а** – трубчатой; **б** – из гаек со стержнями

Fig. 8. Variants of turnbuckles: **a** – tubular; **b** – from nuts with rods

После утяжки здания бандажом необходимо произвести восстановление целостности участков с трещинами путем заделки арматуры класса А400 Ø 8 мм длиной не менее 500 мм в

штробы, прорезанные на глубину не менее 70 мм через два ряда кладки на всю длину трещины по высоте. После закладки арматуры штробы заделать цементно-песчаным раствором марки М200 (рис.9).

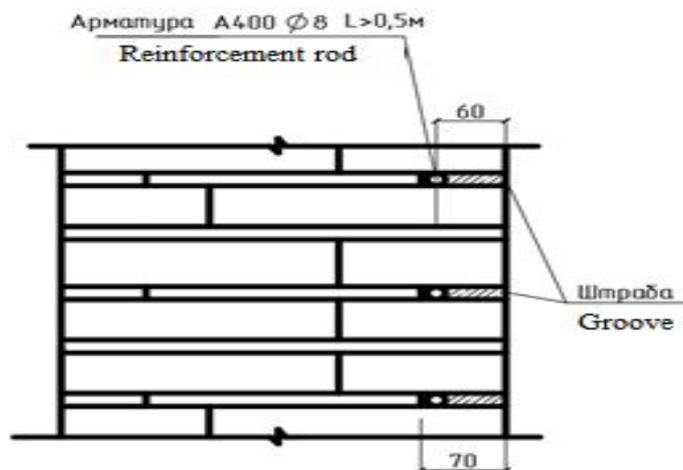


Рис. 9. Усиление кирпичной кладки в местах локального трещинообразования

Fig. 9. Masonry reinforcement in sites of local crackin

Выводы

Решение узкой задачи по усилению отдельных конструкций зданий и сооружений может не дать должного результата, поэтому при обследовании необходимо рассматривать имеющиеся

дефекты и повреждения в комплексе. В рамках данной работы рассмотрено усиление несущих стен жилого дома с увеличением общей жесткости надфундаментной части здания и усиления отдельных трещин.

Список литературы

1. Дубраков С.В., Масалов А.В., Завалишин И.В. Комплексное восстановление нормативного технического состояния керамзитобетонных панелей промышленных зданий, имеющих моральный и физический износ // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23, № 6. С. 77-89.
2. Теоретическое исследование теплотехнических свойств ограждающих конструкций зданий после реконструкции / С.В. Дубраков, О.И. Куценко, В.В. Андриенко, Н.В. Афанасьева, Д.Х. Галаева // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции: в 2 ч. Вологда: Научный центр «Диспут», 2016. С. 36-38.
3. Казачек В.Г. Проблемы нормирования сроков службы зданий и сооружений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2010. № 6. С. 56-71.

4. Оценка технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 70-75.

5. Добромислов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. М.: АСВ, 2008. 72 с.

6. Федюшкин А.Н. Диагностика технического состояния строительных конструкций как основа безопасной эксплуатации зданий и сооружений // Современные тенденции в образовании и науке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 26 частях. Тамбов, 2013. С. 147-148.

7. Обследование конструкций зданий и сооружений / Р.Ф. Джео, С.В. Жерновой, А.А. Солдатов, А.В. Дунаенко // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции : в 3 ч. Пенза, 2019. С. 97-99.

8. Критерии технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений / А.А. Сморчков, С.А. Кереб, Д.А. Орлов, К.О. Барановская // Архитектура, градостроительство, историко-культурная и экологическая среда городов центральной России, Украины и Беларуси: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного архитектора РФ В.Н. Городкова. Брянск, 2014. С. 177-182.

9. Гарькина И.А., Гарькин И.Н. Из опыта обследования строительных конструкций объектов агропромышленного комплекса // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 3. № 6. С. 110-114.

10. Дувалина А., Мартюшев А., Оспищев И. Использование косвенных методов неразрушающего контроля прочности бетона и материалов кирпичной кладки при обследовании зданий и сооружений // Регламент. 2015. № 5 (43). С. 126-127.

11. Рыбалко А.С., Коженко Н.В. Обследование и реконструкция зданий и сооружений // Актуальные вопросы экономики и технологического развития отраслей народного хозяйства: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов, магистрантов и преподавателей. Майкоп, 2016. С. 151-156.

12. Родин А.И., Неверов А.Н. Обследование элементов зданий и жилого кирпичного дома в Москве // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы четырнадцатой Международной научно-технической конференции: в 2 ч. / отв. редактор В. Т. Ерофеев. Саранск, 2015. С. 212-217.

13. Героев А.Е., Вонгай А.О. Энергетические обследования зданий и сооружений // Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства: материалы международной научно-практической конференции. Ростов, 2014. С. 233-234.

14. Живенко А.В., Пожидаев Б.В., Живенко В.А. Типичные проектные ошибки, выявленные при обследованиях зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 1. С. 72-74.

15. Бабусенко М.С. Некоторые задачи, решаемые при обследовании зданий в условиях городской застройки // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2 (6). С. 47-50.

16. Якубсон В.М. Обследование зданий и сооружений: наука и практика // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7 (33). С. 3-4.

17. Соколова О.В., Чечель М.В. Особенности обследования зданий городской застройки // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 7-2. С. 92-95.

18. Гарькина И.А., Гарькин И.Н., Ключев С.В. Необходимый уровень квалификации специалистов по обследованию зданий и сооружений // Успехи современной науки. 2017. Т. 4. № 1. С. 36-39.

19. Шейн А.И., Бакушев С.В., Зернов В.В. Опыт обследования зданий и сооружений // Моделирование и механика конструкций. 2017. № 5. С. 16.

20. Ермошенко Н.С. Современные методы обследования зданий городской застройки // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 24-2. С. 26-27.

References

1. Dubrakov S. V., Masalov A.V., Zavalishin I. V. Kompleksnoe vosstanovlenie normativnogo tekhnicheskogo sostoyaniya keramzitobetonnykh panelei promyshlennykh zdanii, imeyushchikh moral'nyi i fizicheskii iznos [Comprehensive Restoration of the Normative Technical Condition of Expanded Clay Concrete Panels of Industrial Buildings with Moral and Physical Wear]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, vol. 23, no. 6, pp. 77-89 (In Russ.).

2. Dubrakov S. V., Kutsenko O. I., Andriyenko V. V., Afanasyeva N. V., Galaev D. X. [Theoretical study of thermal properties of enclosing structures of buildings after reconstruction]. *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science today: problems and prospects of development. Materials of the international scientific and practical conference]. Vologda, Nauchnyi tsentr "Disput" Publ., 2016, pp. 36-38 (In Russ.).

3. Kazachek V. G. Problemy normirovaniya srokov sluzhby zdanii i sooruzhenii [Problems of standardization of service life of buildings and structures]. *Vestnik*

Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki = Bulletin of Polotsk state University. The F-Series: Construction. Applied science, 2010, no. 6, pp. 56-71 (In Russ.).

4. Smorchkov A. A., Kereb S. A., Orlov D. A., Baranovskaya K. O. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemykh stroitel'nykh konstruksii zdaniy i sooruzhenii [Assessment of the technical condition of the operated building structures of buildings and structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Civil engineering journal*, 2012, no. 7 (33), pp. 70-75 (In Russ.).

5. Dobromyslov A. N. *Otsenka nadezhnosti zdaniy i sooruzhenii po vneshnim priznakam* [Assessment of reliability of buildings and structures on external signs]. Moscow, ASV Publ., 2008, 72 p. (In Russ.).

6. Fedyushkin A. N. [Diagnostics of technical condition of building structures, as a basis for safe operation of buildings and structures]. *Sovremennye tendentsii v obrazovanii i nauke. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Modern trends in science and education. Collection of scientific works on materials of the International scientific-practical conference]. Tambov, 2013, pp. 147-148 (In Russ.).

7. Jeo R. F., Zhernovoy S. V., Soldatov A. A., Dunaenko A.V. [Survey of structures of buildings and structures]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statei XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Collection of articles XXIII International scientific and practical conference: "Fundamental and applied research: current issues, achievements and innovations"]. Penza, 2019, pp. 97-99 (In Russ.).

8. Smirnov A. A., Cereb S. A., Orlov D. A., Baranovskaya O. K. [Criteria for the technical condition of building structures of operated buildings and structures]. *Arkhitektura, gradostroitel'stvo, istoriko-kul'turnaya i ekologicheskaya sreda gorodov tsentral'noi Rossii, Ukrainy i Belarusi. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati zasluzhennogo arkhitekora RF V.N. Gorodkova* [Collection International scientific-practical conference devoted to memory of honoured architect of Russia V. N. Gorodkov: "Architecture, urban planning, historical-cultural and ecological environment of the cities of Central Russia, Ukraine and Belarus"]. Bryansk, 2014, pp. 177-182 (In Russ.).

9. Garkina I. A., Garkin I. N. Iz opyta obsledovaniya stroitel'nykh konstruksii ob'ektov agropromyshlennogo kompleksa [From the experience of inspection of building structures of objects of agro-industrial complex]. *Uspekhi sovremennoi nauki i obrazovaniya = Successes of modern science and education*, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 110-114 (In Russ.).

10. Duvalina A., Martyushev A., Ospishchev I. Ispol'zovanie kosvennykh metodov nerazrushayushchego kontrolya prochnosti betona i materialov kirpichnoi kladki pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenii [The use of indirect methods of non-destructive testing of concrete

strength and brickwork materials in the survey of buildings and structures]. *Reglament = Regulations*, 2015, no. 5 (43), pp. 126-127 (In Russ.).

11. Rybalko A. S., Kozhenko N. V. [Survey and reconstruction of buildings and structures]. *Aktual'nye voprosy ekonomiki i tekhnologicheskogo razvitiya otraslei narodnogo khozyaistva. Materialy regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov, magistrantov i prepodavatelei* [Collection materials of regional scientific and practical conference of students, postgraduates, undergraduates and teachers "Actual questions of economy and technological development of branches of national economy"]. Maikop, 2016, pp. 151-156 (In Russ.).

12. Rodin A. I., Neverov A. N. [Survey of elements of buildings and residential brick house in Moscow]. *Aktual'nye voprosy arkhitektury i stroitel'stva. Materialy chetyrnadtsatoi Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Collection materials of the fourteenth International scientific and technical conference "Actual issues of architecture and construction"]. Saransk, 2015, pp. 212-217 (In Russ.).

13. Geroev A. E., Vongay A. O. [Energy surveys of buildings and structures]. *Stroitel'stvo-2014: sovremennye problemy promyshlennogo i grazhdanskogo stroitel'stva. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Collection materials of the international scientific and practical conference "Construction-2014: modern problems of industrial and civil construction"]. Rostov, 2014, pp. 233-234 (In Russ.).

14. Zhivenko A.V., Pozhidaev B. V., Zhivenko V. A. Tipichnye proektnye oshibki, vyavlenyye pri obsledovaniyakh zdaniy i sooruzhenii [Typical design errors identified during inspections of buildings and structures]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti = Safety in Industry*, 2016, no. 1, pp. 72-74 (In Russ.).

15. Babusenko M. S. Nekotorye zadachi, reshaemye pri obsledovanii zdaniy v usloviyakh gorodskoi zastroiki [Some problems solved in the survey of buildings in urban development]. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti = Technologies of Civil Security*, 2004, no. 2 (6), pp. 47-50 (In Russ.).

16. Yakubson V. M. Obsledovanie zdaniy i sooruzhenii: nauka i praktika [Survey of buildings and structures: science and practice]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Engineering and Construction Magazine*, 2012, no. 7 (33), pp. 3-4 (In Russ.).

17. Sokolova O. V., Chechel M. V. Osobennosti obsledovaniya zdaniy gorodskoi zastroiki [Features of the survey of urban buildings]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike = Technical Sciences-from Theory to Practice*, 2012, no. 7-2, pp. 92-95 (In Russ.).

18. Garkina I. A., Garkin I. N., Klyuyev S. V. Neobkhodimyy uroven' kvalifika-tsii spetsialistov po obsledovaniyu zdaniy i sooruzhenii [The Necessary level of qualification of specialists in the survey of buildings and structures]. *Uspekhi sovremennoi nauki = Advances in Modern Science*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 36-39 (In Russ.).

19. Shein A. I., Bakushev S. V., Zernov V. V. Opyt obsledovaniya zdanii i sooruzhenii [Experience of survey of buildings and structures]. *Modelirovanie i mekhanika konstruksii = Modeling and Mechanics of Structures*, 2017, no. 5, pp. 16 (In Russ.).

20. Yermoshenko N. S. Sovremennyye metody obsledovaniya zdanii gorodskoi zastroiki [Modern methods of survey of urban buildings]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the Development of Science and Education*, 2017, no. 24-2, pp. 26-27 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Дубраков Сергей Валерьевич, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Sergey V. Dubrakov, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Дубракова Ксения Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dko1988@yandex.ru

Kseniya O. Dubrakova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dko1988@yandex.ru

Масалов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Alexander V. Masalov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial and Civil Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sirius080993@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-73-89>

Оптимизация процессов кондиционирования воздуха здания с применением режима естественного охлаждения

М. Н. Жерлыкина¹✉, Т. В. Щукина¹, А. Гурбангулыев¹

¹ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
ул. 20-летия Октября 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: zherlykina@yandex.ru

Резюме

Цель исследования. Целью работы является проведение прикладного исследования теплового режима производственного помещения промышленного здания и разработка процессов кондиционирования воздуха, включающих поиск целесообразного схемного решения его обработки и повышение эффективности работы системы путем использования холода наружного воздуха.

Методы. Для достижения поставленных целей в работе на основании результатов энергоаудита была разработана методика расчета потоков вредных выделений в производственном помещении в режиме «Производство» и определены тепловые нагрузки объектов исследования. Проанализированы возможные варианты обработки воздуха системами технологического кондиционирования, в том числе, с учетом минимизации энергетических затрат. Для ассимиляции избыточной теплоты в теплый период года и рационального выбора процесса обработки воздуха с целью экономии потребления тепловой энергии предлагаются способы обработки воздуха с подогревом и без него. В холодный период года предлагается осуществлять кондиционирование воздуха с применением холода наружного воздуха. Универсальность методики позволяет определять осуществимый в реальных условиях процесс, в том числе корректировать схему обработки, в которой необходим предподогрев воздуха.

Результаты. Результатом проведенной исследовательской работы является разработка ряда инженерно-технических решений для обеспечения энергетической эффективности работы инженерной системы и повышения потребительского качества объектов исследования.

Заключение. Реализация разработанных мероприятий по тепловой защите объекта исследования и использованию энергоэффективных инженерных решений позволит достигнуть следующих результатов: повысить потребительское качество зданий, довести параметры внутреннего микроклимата до нормативной величины; значительно продлить срок службы ограждающих конструкций, с высокой степенью точности доводить качество воздуха, предназначенного для ведения технологического процесса, обеспечить экономию расхода энергоресурсов на кондиционирование воздуха за счет использования холода наружного воздуха; поддерживать минимальную температуру охлаждения в результате смешения наружного и рециркуляционного воздуха без риска обмерзания теплообменника и образования льда.

Ключевые слова: теплоступления; кондиционирование воздуха; процесс обработки воздуха; холод; охладитель; воздухонагреватель; рециркуляция.

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

© Жерлыкина М.Н., Щукина Т.В., Гурбангулыев А., 2020

Для цитирования: Жерлыкина М. Н., Щукина Т. В., Гурбангульев А. Оптимизация процессов кондиционирования воздуха здания с применением режима естественного охлаждения // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 73-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-73-89>.

Поступила в редакцию 12.03.2020

Подписана в печать 06.04.2020

Опубликована 20.04.2020

Optimization of Building Air Conditioning Processes Applying Free Cooling

Mariya N. Zherlykina ¹ ✉, Tatiana V. Shchukina ¹, Arslan Gurbangulyev ¹

¹ Voronezh State Technical University
20-letiya Oktyabrya str. 84, Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: zherlykina@yandex.ru

Abstract

Purpose of research is to carry out an applied research of the thermal behaviour of the production premise of an industrial building and to develop air conditioning processes, including the search for an expedient circuit design for conditioning and increasing the effectiveness of the system by using the cold outdoor air.

Methods. In the work, based on the results of the energy audit, a technique for calculating the flows of harmful emissions in the production premise in the Production mode was developed and the thermal loads of the objects of the study were determined to achieve the set objectives. Possible options for air processing by technological conditioning systems including the minimization of energy costs are analyzed. For the assimilation of excess heat in the warm season and a rational choice of the air treatment process in order to save thermal energy consumption, techniques of air treatment with and without heating are proposed. In the cold season, it is proposed to carry out air conditioning using cold outdoor air. The versatility of the technique makes it possible to determine a process feasible in real conditions, including adjusting the processing scheme, in which air preheating is required.

Results. The result of the research work is the development of a number of engineering and technical solutions to ensure the energy efficiency of the engineering system and improve the consumer quality of the research objects.

Conclusion. Implementation of the developed measures for thermal protection of the research object and the use of energy-efficient engineering solutions will allow achieving the following results: to improve the consumer quality of buildings, to bring the parameters of the internal microclimate to the standard value; to extend significantly the service life of enclosing structures, to ensure the quality of the air intended for the technological process with a high degree of accuracy, to ensure energy savings for air conditioning through the use of the cold outdoor air; to maintain a minimum cooling temperature by mixing outdoor and recirculated air without the risk of frost formation on the surface of the heat exchanger and the formation of ice.

Keywords: heat supply; air conditioning; air treatment process; cold; cooler; air heater; recirculation.

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

For citation: Zherlykina M. N., Shchukina T. V., Gurbangulyev A. Optimization of Building Air Conditioning Processes Applying Free Cooling // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 73-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-73-89>.

Received 23.03.2020

Accepted 06.04.2020

Published 20.04.2020

Введение

В настоящее время мясная промышленность – одна из крупнейших и

важных отраслей экономики Российской Федерации. Предприятия пищевой

промышленности выполняют различные виды работ для осуществления производства мяса, мясных консервов, колбасных изделий, полуфабрикатов. Эффективность производства в значительной мере зависит от ряда факторов, к которым следует отнести техническую оснащенность и соответствие поддержания параметров микроклимата требованиям ведения технологического процесса в помещениях мясоперерабатывающих предприятий [1, 2].

Отделения подготовки мясного сырья – помещения с одновременным выделением теплоты и влаги. Воздухообмен определяют исходя из необходимости ассимиляции и удаления вредных выделений. Практически можно принять, что процессы тепло- и массообмена являются стационарными [1].

В производственных помещениях применяется система кондиционирования, при работе которой воздух подается во все периоды рассредоточено в верхнюю зону. Вытяжка механическая общеобменная из верхней зоны. В отделениях подготовки мясного сырья допускается рециркуляция воздуха в течение всех периодов года, если в воздухе отсутствуют болезнетворные бактерии, пожаровзрывоопасные вредные вещества и дымовые газы [3].

Материалы и методы

Объектом исследования является производственное помещение предприятия мясной промышленности, расположенного в городе Курск – комната

подготовки мясной продукции. Технологический процесс включает поступление мясного сырья в виде сформированных брикетов температурой +2 °С, упакованных в полиэтиленовую пленку или в полиэтиленовые ящики на деревянных поддонах, габаритами 1200 × 800 мм. Далее брикеты, перемещаясь по линии, обрабатываются и подаются в следующее помещение. В сутки осуществляется обработка 21000 кг продукции.

Нормируемые параметры внутреннего воздуха равны: температура помещения: +10 (+/-2) °С, относительная влажность – 70 %. Следует отметить, что в инженерных решениях кондиционирования воздуха подобных помещений пренебрегается точность достижения и поддержания относительной влажности воздуха.

Расчет теплопритоков выполняется с учетом рекомендаций [4]. Тепловой баланс помещения рассчитывается по зависимости, Вт:

$$\sum Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (1)$$

где Q_1 – теплопоступления через ограждающие конструкции, кВт; Q_2 – теплопоступления от солнечной радиации, кВт; Q_3 – теплопоступления от продукта при холодильной обработке; Q_4 – теплопоступления от системы вентиляции помещения, кВт; Q_5 – эксплуатационные теплопоступления (от освещения, от персонала, от электродвигателей, от открывания дверей), кВт; Q_6 – теплопоступления от продукции при

остывании, кВт, определяемые по аналитической зависимости:

$$Q_5 = \frac{0,278 \cdot M_k \cdot \Delta i}{\tau}, \quad (2)$$

где M_k – суточное поступление продукта в камеру, т; Δi – разность удельных энтальпий продукта, кДж/кг, $\Delta i = i_2 - i_1$, где i_1 – удельная энтальпия, соответствующая начальной температуре продукта, кДж/кг; i_2 – удельная энтальпия, соответствующая конечной температуре продукта, кДж/кг; τ – продолжительность холодильной обработки продукта, ч; Q_6 – теплоприток от тары при остывании, кВт, определяемый по аналитической зависимости:

$$Q_6 = \frac{0,278 \cdot M_c \cdot c_c \cdot \Delta t}{\tau}, \quad (3)$$

где M_c – суточное поступление тары, т, при этом масса тары составляет 20 % от массы груза; c_c – удельная теплоемкость тары, кДж/(кг×К), где удельную теплоемкость принимают по материалу, из которого она изготовлена; t_1 – температура тары при поступлении груза, °С; t_2 – температура тары при выходе груза, °С.

Предложено центральное кондиционирование объекта строительства как наиболее рациональное, позволяющее обеспечить требуемые параметры воздушной среды для течения технологического процесса, а также предусмотреть решения по энергосбережению. В производственное помещение подается смесь наружного и внутреннего воздуха в различном количественном соотношении. В конструкции центрального кондиционера необходимо предусмотреть

возможность обработки рециркуляционного воздуха. Применение рециркуляции в системах кондиционирования направлено на экономию теплоты при работе секций подогрева, а также холода при охлаждении и осушении воздуха. Рециркуляция обеспечивается камерой (секцией) двойного смешивания. Процент рециркуляции возможно варьировать с помощью клапана с электроприводом в зависимости от технологического цикла помещения и периода года.

Результаты и их обсуждение

Исследование выполнено для режима «Производство» для теплого и холодного периода года.

Блок-схема режима «Производство» для теплого периода года представлена на рис. 1.

Схема воздухообмена описана выше. Полная рециркуляции воздуха возможна только в периоды между технологическими циклами, в остальное время должен быть обеспечен расход наружного воздуха, согласно санитарным нормам для помещения, не менее 350...400 м³/ч.

С целью определения параметров приточного воздуха для достижения в рабочей зоне помещения относительной влажности 70 % выполнены теоретические исследования с помощью *Id*-диаграммы состояния влажного воздуха (рис. 2). Значение углового коэффициента, ε , кДж/кг, определяется по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{I_h - I_{outer}}{d_h - d_{outer}}, \quad (4)$$

где I_h – удельная энтальпия внутреннего воздуха в помещении, кДж/кг; I_{outer} – удельная энтальпия наружного воздуха

для периода, кДж/кг; d_h – влагосодержание внутреннего воздуха в помещении, г/кг; d_{outer} – влагосодержание наружного воздуха для периода, г/кг.

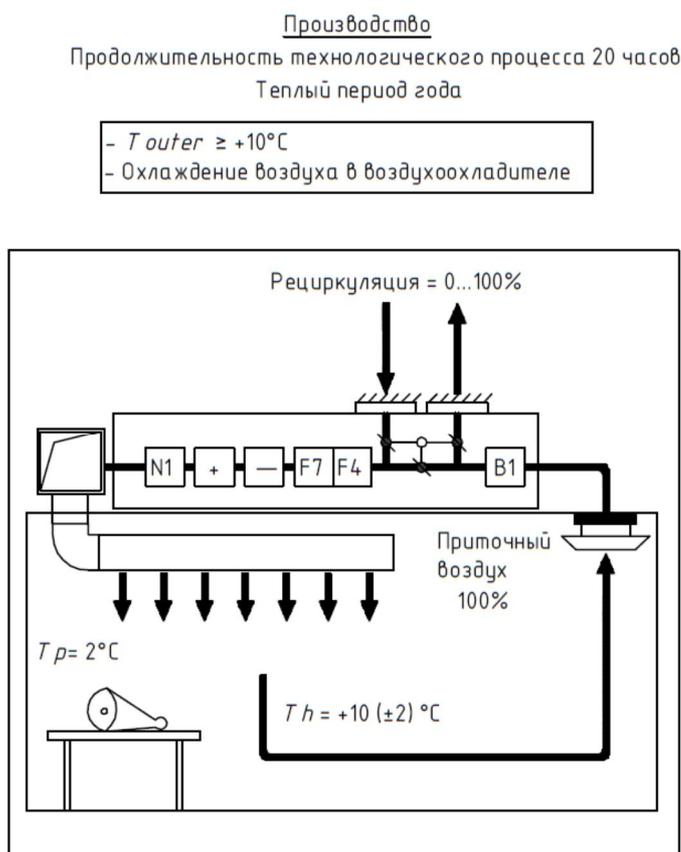


Рис. 1. Блок-схема режима «Производство» для теплого периода года: **T_{outer}** – температура наружного воздуха, °C; **T_{in}** – температура приточного воздуха, °C; **T_h** – температура внутреннего воздуха, °C; **T_p** – температура продукта, °C; **B1** – вытяжной вентилятор; **N1** – приточный вентилятор; **F4** – фильтр грубой очистки; **F7** – фильтр тонкой очистки; «-» – охладитель воздуха; «+» – нагреватель воздуха

Fig. 1. Block diagram of the Production mode for the warm season: **T_{outer}** – outdoor air temperature, °C; **T_{in}** – supply air temperature, °C; **T_h** – indoor air temperature, °C; **T_p** – product temperature, °C; **B1** – exhaust fan; **N1** – supply fan; **F4** – coarse filter; **F7** – fine filter; «-» – air cooler; «+» – air heater

Местоположение точек на диаграмме (рис. 2), характеризующих параметры приточного (точка «N»), смешенного (точка «C») воздуха, определяется по методике, изложенной в [5]. Особенностью определения положения точки

«O», характеризующей состояние воздуха после охладителя, является то, что для получения в помещении требуемой влажности внутреннего воздуха (70 %), приточный воздух необходимо переохлаждать, а затем догревать. Догрев

реализуется средствами калорифера, предусмотренного в центральном кондиционере. Следует определять минимально возможную температуру охлаждения воздуха, которую можно получить от поверхностного охладителя при параметрах холодоносителя. В случае использования водного раствора про-

пиленгликоля с концентрацией 35 % температура подачи будет равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура обратного холодоносителя составит $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате технического подбора поверхностного воздухоохладителя для рассматриваемого случая минимально возможная температура охлаждения воздуха равна $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

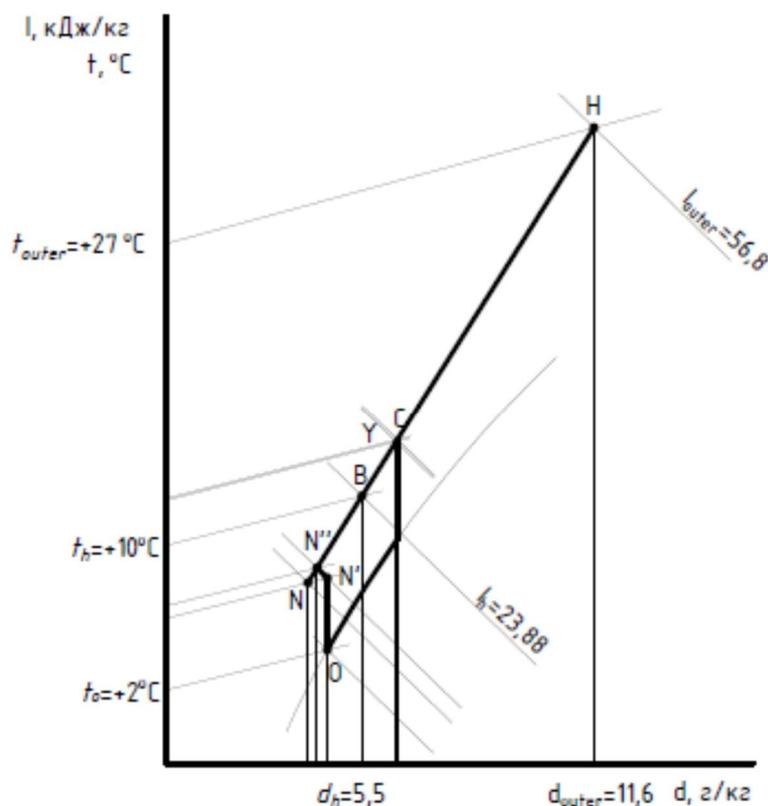


Рис. 2. Построение на Id-диаграммы процесса обработки воздуха для помещения подготовки мясной продукции в теплый период года (вариант 1): «**NBY**» – процесс изменения состояния воздуха в производственном помещении; «**NY**» – процесс смешивания наружного и рециркуляционного (уходящего) воздуха; «**Y**» – точка, характеризующая состояние уходящего воздуха; «**C**» – точка, характеризующая состояние среды после смешивания рециркуляционного и наружного воздуха; «**CO**» – процесс обработки воздуха в охладителе; «**ON'**» – процесс нагрева воздуха в воздухонагревателе; «**N''N'**» – процесс адсорбционного осушения воздуха в помещении

Fig. 2. Building an Id-diagram of the air treatment process for the meat production preparation room in the warm season (option 1): «**NBY**» – process of changing the condition of the air in the production by the Prosecutor; «**NY**» – process of mixing outdoor and recirculated (outgoing) air; «**Y**» – point, characterizing the state of the outgoing air; «**C**» – point, characterizing the state of the medium after mixing of recirculated and outdoor air; «**CO**» – process of air treatment in cooling; «**ON'**» – the process of heating the air in vozduhonosnye the user; «**N''N'**» – the process of adsorption dehumidification of indoor air

Далее следует построение на *Id*-диаграмме влажного воздуха процесса догрева приточного воздуха до рассчитанных параметров, соответствующих точке «N». Как видно из рис. 2 процесс обработки воздуха в центральных кондиционерах завершить в точке «N» невозможно. Процесс завершится в точке «N'» (прямая «ON'»). Подготовленный воздух в точке «N'» будет иметь температуру, равную +6 °С, а относительную влажность, равную 75%. При этом относительная влажность в точке «N'» на 4% больше, чем значение точки «N».

Далее подготовленный воздух подлечит адсорбционному осушению [6, 7]. Отличительной особенностью адсорбционного осушителя является его способность осушать воздух, имеющий низкую температуру. Поэтому устройства данного типа используются для осушения холодных помещений. Данный способ осушения имеет ограничения, так как по мере насыщения сорбента влагой его осушающая способность снижается и требуется регенерация.

Процесс осушения воздуха адсорбентами на *Id*-диаграмме влажного воздуха изображается линией постоянной энтальпии. В данном исследовании завершить процесс в точке «N» так же невозможно. Процесс завершится в точке «N''». Точка попадает на прямую «NBУ», которая характеризует процесс изменения состояния воздуха в помещении. Однако подготовленный воздух будет иметь температуру на 0,7 °С выше, чем необходимо подавать, а влаго-

содержание составит на 0,1 г/кг больше требуемого. На этом построение требуемого процесса обработки воздуха на *Id*-диаграмме влажного воздуха следует завершить. Расчет параметров воздуха выполнен с помощью прикладной программы при атмосферном давлении 96,8 кПа, температуре хладоносителя 2,50 °С.

Достоинством предлагаемой методики является возможность достижения минимальной температуры охлаждения в результате смешения наружного и рециркуляционного воздуха без риска обмерзания теплообменника и образования льда. Сравнивая с известными расчетами [4], предлагаемый позволяет подобрать климатическое оборудование меньшей холодильной мощности, расхода среды, снизить аэродинамические и гидравлические характеристики, а также габариты.

Возможен другой вариант обработки воздуха в системе кондиционирования воздуха в теплый период года, построение на *Id*-диаграммы состояния влажного воздуха которого представлено на рис. 3.

Процесс догрева приточного воздуха до рассчитанной температуры и влажности, как видно из рис. 3, завершить в точке «N» невозможно. Процесс завершится в точке «N'''» (прямая «ON'''»). Точка попадает на прямую «NBУ», которая характеризует процесс изменения состояния воздуха в помещении. Однако подготовленный воздух будет иметь температуру на 1,5 °С вы-

ше, чем необходимо подавать, а влаго-содержание составит на 0,4 г/кг больше требуемого. На этом построение требуемого процесса обработки воздуха на *Id*-диаграмме влажного воздуха завер-

шается. Расчет процесса выполнен с помощью прикладной программы для теплого периода года при атмосферном давлении 96,8 кПа, температуре хладоносителя 2,50 °С.

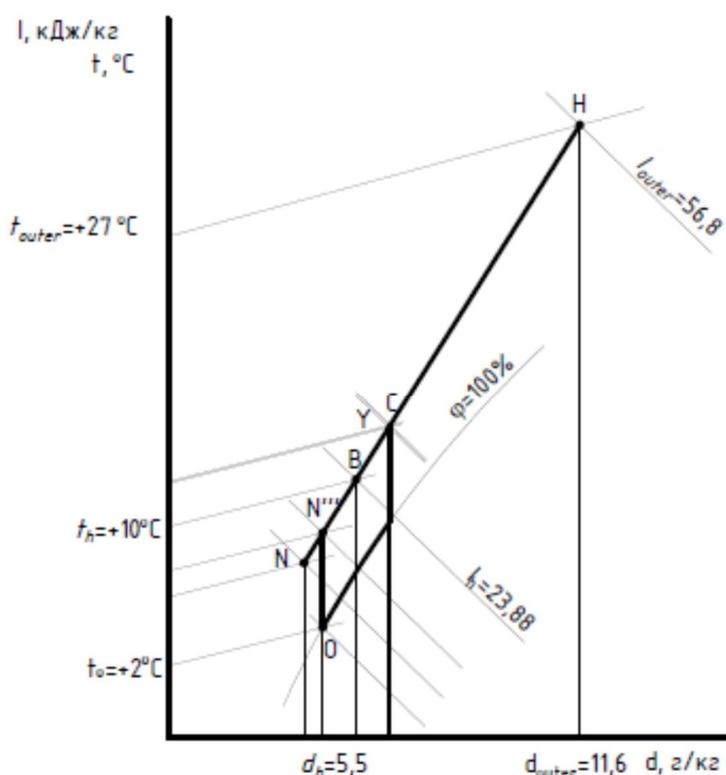


Рис. 3. Построение на *Id*-диаграммы процесса обработки воздуха для помещения подготовки мясной продукции в теплый период года (вариант 2): «**NBY**» – процесс изменения состояния воздуха в помещении; «**HY**» – процесс смешивания наружного и рециркуляционного воздуха; «**Y**» – состояние уходящего воздуха; «**C**» – состояние воздуха после смешивания рециркуляционного воздуха с наружным воздухом; «**CO**» – процесс обработки воздуха в охладителе; «**ON''**» – нагрев воздуха в воздушнонагревателе

Fig. 3. Building an *Id*- diagram of the air treatment process for the preparation of meat products in the warm season (option 2): «**NBY**» – changing the air condition in the room; «**HY**» – process of mixing outdoor and recirculating air; «**Y**» – outgoing air; «**C**» – air after mixing the recirculating air with the outside air; «**CO**» – air treatment process in the cooler; «**ON''**» – air heating in the air heater

Следует отметить, что в помещении, выбранном в качестве объекта исследования, поддержание прецизионных параметров (точность температуры +/- 0,5 °С, точность влажности +/- 1 %), не требуется.

Следует уточнить, что для предложенных схем обработки приточного воздуха в системах кондиционирования помещения подготовки мясной продукции для теплого периода года не рекомендуется использовать адсорбционное

осушение при отклонении параметров от рассчитанных – влагосодержания на величину 0,1 г/кг, относительной влажности – 4 %, температуры – 0,7 °С.

Блок-схема режима «Производство» для холодного периода года представлена на рис. 4.

Наиболее рациональным решением, с точки зрения энергосбережения, является применение системы «free colling», что означает использование холода наружного воздуха. Для возможности внедрения решения в систему кондиционирования необходимо принять допущение, что началом периода работы си-

стемы «free colling» является достижение наружной температуры воздуха -6 °С. Приточный воздух подготавливается путем двухступенчатой фильтрации, путем охлаждения наружным воздухом, а также с помощью нагрева водяным калорифером и подается в помещение с выходной температурой, равной +6 °С. Так же, как и в теплый период года, полная рециркуляция воздуха возможна только в периоды между технологическими циклами, в остальное время должен быть обеспечен расход наружного воздуха для помещения не менее 350...400 м³/ч.

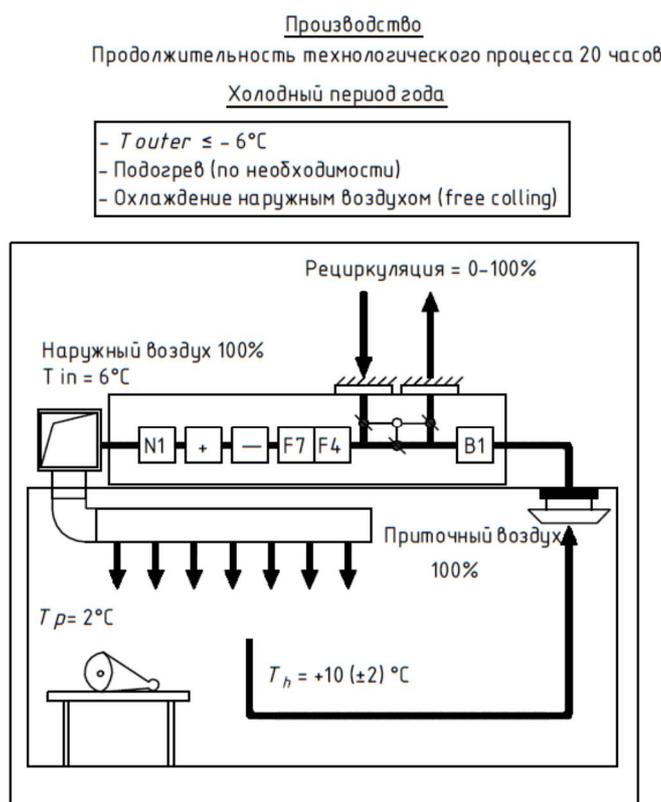


Рис. 4. Блок-схема режима «Производство» для холодного периода года:

B1 – вытяжной вентилятор; **N1** – приточный вентилятор; **F4** – фильтр грубой очистки; **F7** – фильтр тонкой очистки; «-» – охладитель воздуха; «+» – нагреватель воздуха

Fig. 4. Block diagram of the «Production» mode for the cold period of the year: **B1** – exhaust fan; **N1** – supply fan; **F4** – coarse filter; **F7** – fine filter ; «-» – air cooler; «+» – air heater

Недостатками существующих методик моделирования процессов обработки воздуха являются: ведение расчета системы «free colling» при прямоточном режиме, наличие перерасхода теплоносителя, значительные величины тепловой мощности и габаритные размеры климатического оборудования.

В результате проведенного теоретического исследования в холодный период года при расчетной наружной температуре воздуха обеспеченностью 0,98 не представляется возможным оценить способны ли центральные кондиционеры обеспечить в обслуживаемом помещении требуемую относительную влажность воздуха, равную 70 %, и требуемую температуру, согласно технологическим нормам проектирования предприятий мясной промышленности.

Для решения задачи выполняется построение процесса обработки воздуха на *Id*-диаграмме для холодного периода года. Методика изложена для системы, позволяющей обеспечивать постоянный температурно-влажностный режим в помещении и работающей с применением холода наружного воздуха. Система кондиционирования поддерживает заданные параметры воздуха и обеспечивает подачу санитарной нормы наружного воздуха с учетом пониженной температуры внутри помещений без использования нагревательного оборудования. Построение процесса изображено на рис. 5.

Методика построения включает определение положения точек «N» и «B»,

характеризующих состояние наружного и внутреннего воздуха. Определяется положение точки «Y», характеризующей состояние воздуха, уходящего из помещения, затем положение точки «N», характеризующей состояние приточного воздуха. Находится положение точки «C», характеризующей состояние воздуха на выходе из камеры смешивания. При смешивании внутреннего и наружного воздуха в холодный период года реализуется охлаждение по системе «free colling» [8, 9, 10]. Охлаждение происходит посредством уличного холода. Система работает на переменном количественном соотношении наружного и внутреннего воздуха, удаляемого из помещения [11].

Далее необходимо построить на *Id*-диаграмме влажного воздуха процесс догрева приточного воздуха до рассчитанных параметров (прямая «ON»). Рассчитанные параметры соответствуют построенной ранее точке «N», принадлежащей прямой «NBY» – процесс в помещении. Процесс завершится успешно, а именно параметры воздуха будут составлять – температура не менее +10 °С, относительная влажность равна 70 %, следовательно, в помещении возможно поддержание требуемых технологией параметров. Как видно из рис. 5, догрев составит всего 1,11 °С. На этом построения требуемого процесса обработки воздуха на *Id*-диаграмме влажного воздуха завершатся.

Проведено исследование процесса обработки воздуха для других наружных температур в диапазоне от $t_{н}$ до -6 °С.

Изменение наружной температуры на Id -диаграмме будем вести по линии $d = \text{const}$. Цель – определить эффективный процент рециркуляции для разной наружной температуры, а также произвести корректировку подбора секции нагревателя. Процессы изображены так

же на рис. 5: при наружной температуре t_{outer} , °С эффективный процент рециркуляции составит 80 %, догрев составляет 0,27 °С; при -15 °С составит 75 %, догрев на 0,32 °С; при -6 °С составит 60 %, догрев на 0,62 °С.

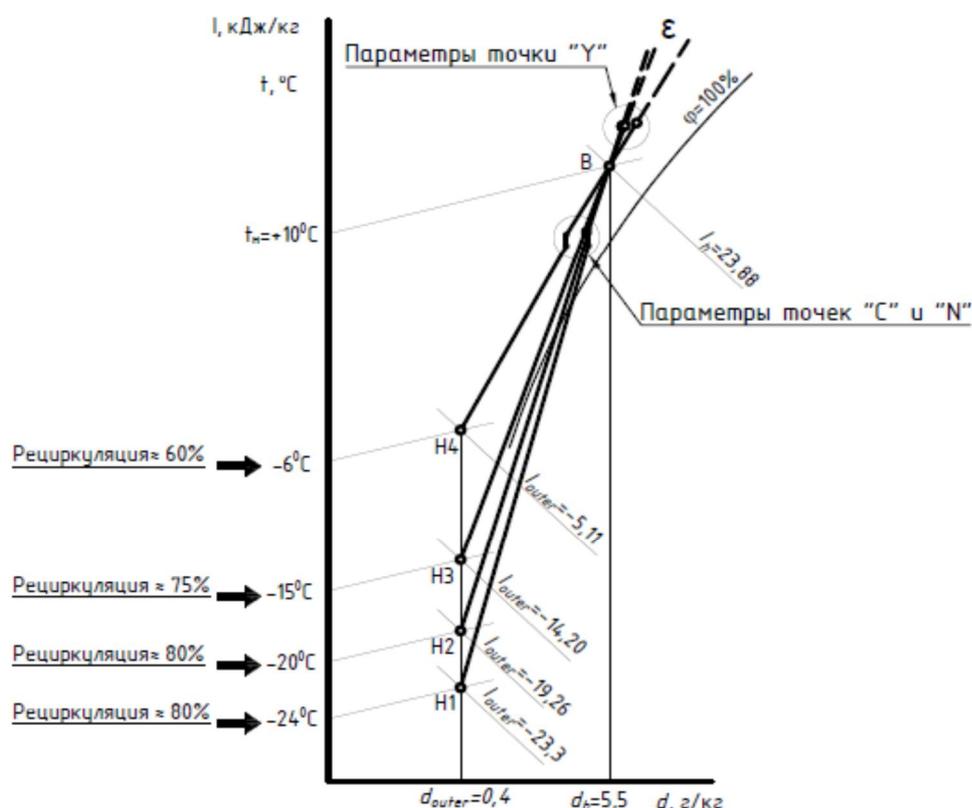


Рис. 5. Построение на Id -диаграммы процесса обработки воздуха для помещения подготовки мясной продукции в холодный период года: «**B**» – необходимое состояние воздуха в помещении; «**NiYi**» – процесс смешивания наружного и рециркуляционного воздуха; «**Ci**» – состояние воздуха после смешивания рециркуляционного и наружного воздуха; «**CiNi**» – процесс обработки воздуха в воздушнонагревателе

Fig. 5. Building an Id -diagram of air treatment process for meat production preparation room in cold sea son: «**B**» –required state of indoor air; «**NiYi**» – process of mixing outdoor and recirculating air; «**Ci**» – air after mixing recirculating and outdoor air; «**CiNi**» – air treatment process in an air heater

Достоинством предлагаемой методики является использование данных о системе «free colling» при подборе нагревателя, уменьшение тепловой мощности, габаритов, аэродинамических и

гидравлических характеристик климатического оборудования.

Расчет процесса выполнен с помощью прикладной программы для теплового периода года.

Следует отметить, что в зависимости от наружной температуры воздуха рекомендуется использовать установленный эффективный процент рециркуляции воздуха [3, 12, 13, 14]. Расчеты показали, что интервал времени эксплуатации секции нагревателя в холодный период крайне мал.

Из рис. 5 следует, что в диапазоне температур, равном от $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, процесс смешивания наружного и уходящего воздуха проходит через область перенасыщенного воздуха – «зона тумана», где вода находится в воздухе во взвешенном состоянии в жидкой или твердой фазе. «Зона тумана» – область I_d -диаграммы, лежащей ниже кривой $\varphi = 100\%$. Процессы, попадающие в дан-

ную область, считаются не осуществимыми в системах кондиционирования воздуха¹ [8, 15, 16 – 19].

Для того чтобы привести процесс в область, где возможна работа системы, необходимо в диапазоне температур от $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ предусмотреть предподогрев наружного воздуха (1 ступень нагрева). Предподогрев столь низких температур воздуха рекомендуется реализовать с помощью электрического калорифера, во избежание замерзания теплоносителя в случае аварийной ситуации. Диапазон рециркуляции в холодный период года составит $60\text{...}75\%$. Схема системы кондиционирования воздуха с предподогревом представлена на рис. 6.

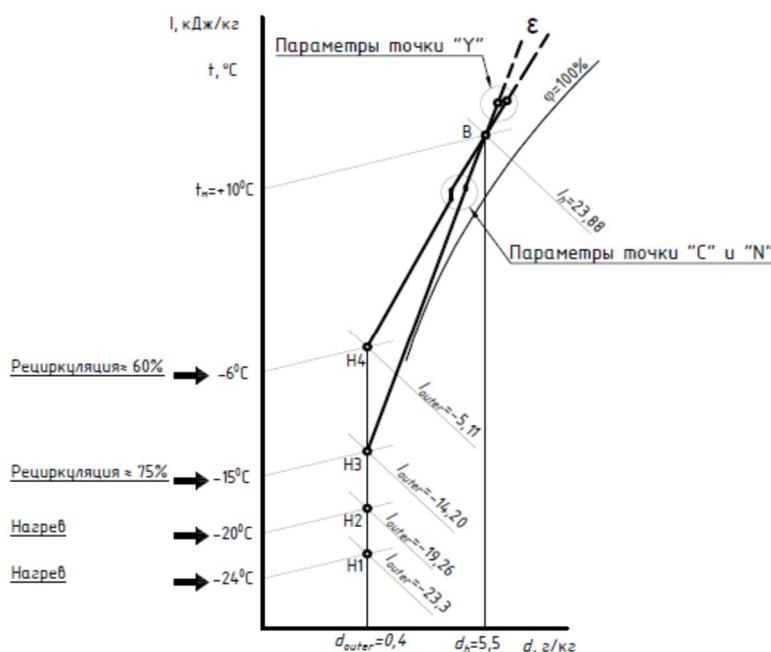


Рис. 6. Построение на I_d -диаграммы процесса обработки воздуха для помещения подготовки мясной продукции в холодный период года с предподогревом

Fig. 6. Building an I_d -diagram of the air treatment process for the preparation of meat products in the cold period of the year with preheating

¹ Полосин И. И. Динамика процессов промышленной вентиляции: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2001.

Выводы

Количество приточного воздуха для систем кондиционирования помещений подготовки мясной продукции необходимо определять с учетом разработанных рекомендаций, приведенных в виде аналитической зависимости (1).

Для теплого периода года при технологическом режиме «Производство» целесообразно применение рециркуляции воздуха, обеспечивая подачу необходимой санитарной нормы воздуха. При этом будет достигнуто энергосбережение при работе инженерной системы, а также улучшены условия ее эксплуатации. Универсальность методики заключается в вариантности решений при различных климатических условиях и тепловлажностном состоянии воздушной среды в помещении. Так, в случае невозможности осуществления процесса кондиционирования, подтвержденного с помощью построения на *Id*-

диаграмме, разработана схема обработки воздуха в системе кондиционирования с подогревом.

Для холодного периода года при технологическом режиме «Производство» кондиционирование следует производить с использованием холода наружного воздуха – система «free cooling». В случае, если процессы обработки воздуха являются неосуществимыми, что возможно уточнить с помощью построения на *Id*-диаграмме, разработана схема обработки воздуха в системе кондиционирования с предподогревом.

Следует учесть, что разработанные рекомендации предназначены для цикла «Производство», входящего в состав технологического процесса в помещении подготовки мясной продукции. Для комплексной оценки работы системы кондиционирования воздуха следует выполнить исследования для технологических циклов «Мойка» и «Сушка».

Список литературы

1. Антипов А. В., Дугаров Ц. Б. Сублимационная сушка как метод консервирования продуктов // Мясные технологии. 2011. № 12(108). С. 48-51.
2. Пат. 2442426 Российская Федерация, МПК А23В 4/00. Способ управления процессом термообработки сырокопченых и сыровяленых мясных и рыбных изделий в климатической конвективной установке камерного типа / Юзов С. Г.; заявитель и патентообладатель Московский государственный университет прикладной биотехнологии. № 2010132874/13; заявл. 05.08.2010; опубл. 20.02.2012, Бюл. №5.
3. Исследование распределения концентраций вредных веществ в производственных помещениях предприятий топливно-энергетического комплекса / М. Н. Жерлыкина, С. А. Яременко, А. А. Мерциев, Н. А. Драпалюк // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 50-54.

4. Патент 2016619895 Российская Федерация. Расчёт удельных теплопритоков через многослойные ограждения / Шевченко А. В., Алешин В. И., Алешин В. В. 2016.

5. Жерлыкина М. Н., Яременко С. А. Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений. Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. 164 с.

6. Аверкин А. Г., Еремкин А. И., Аверкин Ю. А. Осушение воздуха на основе твердых сорбентов // Региональная архитектура и строительство. 2019. Т. 3. № 40. С. 150-156.

7. Колесников Е. О., Шашкин В. Ю. Кондиционирование воздуха промышленных предприятий // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. 2016. Т. 4. № 1. С. 124-127.

8. Буренин В. В., Воробьев Д. К. Системы кондиционирования воздуха и воздушные кондиционеры для производственных помещений // Холодильная техника. 2017. № 7. С. 30-36.

9. Андреев Л. Н., Салмин-Ольшко К. Б., Бикчантаева Р. А. Повышение качества макро- и микроклимата животноводческих помещений // Мир инноваций. 2018. № 1-2. С. 122-127.

10. Акимов В. И., Домнич С. А. Повышение качества функционирования системы кондиционирования промышленного объекта // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник науч. тр. 3 Междунар. молодежной науч.-практ. конференции. Курск, 2016. С. 28-32.

11. Костин В. И., Русских Е. Ю. Расчет мощности систем охлаждения помещений // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2012. № 5. С. 18-23.

12. Системы промышленного кондиционирования воздуха типа «чиллер-фанкойл» и энергосберегающие системы / С. Т. Мирошниченко, В. А. Пухлий, В. Г. Потехин, В. В. Соколов, Е. В. Глушкова, А. А. Журавлев, В. О. Пантель // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: сб. статей по материалам междунар. науч.-практ. конференции. Севастополь, 2018. С. 807-816.

13. Лёвин В. Проектирование промышленных систем кондиционирования // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2012. № 10(130). С. 69-73.

14. Костин В. И., Русских Е. Ю. Проблемы расчета расходов холода на системы кондиционирования воздуха промышленных зданий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 5(641). С. 60-64.

15. Определение энергетической эффективности механической вентиляции помещений с выделением вредных веществ / Р. А. Шепс, А. В. Шашин, М. Н. Жерлыкина, В. В. Шичкин // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 2(9). С. 62-68.

16. Страхова Н. А., Глазунова Е. К. Вентиляция. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2014. 46 с.
17. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А. Отопление и вентиляция производственных помещений. Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2007. 399 с.
18. Луговский С. И., Дымчук Г. К. Совершенствование систем промышленной вентиляции. М.: Стройиздат, 1991. 130 с.
19. Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. М.: Машиностроение, 1984. 157 с.

References

1. Antipov A. V., Dugarov C. B. Sublimacionnaya sushka kak metod konservirovaniya produktov [Freeze-drying as a method of preserving products]. *Myasnye tekhnologii = Meat technologies*, 2011, no. 12(108), pp. 48-51 (In Russ.).
2. Yuzov S. G. *Sposob upravleniya processom termoobrabotki syro-kopchenyh i syrovyalenyh myasnyh i rybnyh izdelij v klimaticheskoy kon-vektivnoj ustanovke kamernogo tipa* [Method for controlling the process of heat treatment of smoked and dried meat and fish products in a climatic convective chamber-type installation]. Patent RF, 2442426, МПК А23В 4/00, 2012 (In Russ.).
3. Zherlykina M. N., Yaremenko S. A., Mershchiev A. A., Drapalyuk N. A. Issledovanie raspredeleniya koncentracij vrednyh veshchestv v proizvodstvennyh pomeshcheniyah predpriyatij toplivno-energeticheskogo kompleksa [Research on the distribution of harmful substances concentrations within industrial spaces of fuel and energy complex enterprises]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 50-54 (In Russ.).
4. Shevchenko A. V., Aleshin V. I., Aleshin V. V. *Raschyot udel'nyh teploprитokov cherez mnogoslojnye ograzhdeniya* [Calculation of specific heat flows through multilayer fences]. Patent RF, 2016619895, 2016 (In Russ.).
5. Zherlykina M. N., Yaremenko S. A. *Sistemy obespecheniya mikroklimate zdaniy i sooruzhenij* [Systems for ensuring the microclimate of buildings and structures]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2018, 164 p. (In Russ.).
6. Averkin A. G., Eremkin A. I., Averkin Yu. A. Osushenie vozduha na osnove tverdyh sorbentov [Air drainage based on solid sorbents]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo = Regional Architecture and Engineering*, 2019, vol. 3, no. 40, pp. 50-156 (In Russ.).
7. Kolesnikov E. O., Shashkin V. Yu. [Air conditioning of industrial enterprises]. *Energo- i resursosberezhenie v teploenergetike i social'noj sfere. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov, aspirantov, uchenykh* [Energy and resource saving in heat power engineering and social sphere. Proceedings of the international scientific

and technical conference of students, postgraduates, scientists], 2016, vol. 4, no. 1, pp. 124-127 (In Russ.).

8. Burenin V. V., Vorob'ev D. K. Sistemy kondicionirovaniya vozduha i vozdushnye kondicionery dlya proizvodstvennykh pomeshchenij [Air conditioning systems and air conditioners to be used in production areas]. *Holodil'naya tekhnika*, 2017, no. 7, pp. 30-36 (In Russ.).

9. Andreev L. N., Salmin-Ol'shko K. B., Bikchantaeva R. A. Povyshenie kachestva makro- i mikroklimate zhivotnovodcheskikh pomeshchenii [Improving the quality of macro-and microclimate of livestock premises]. *Mir innovacij = World of Innovation*, 2018, no. 1-2, pp. 122-127 (In Russ.).

10. Akimov V. I., Domnich S. A. [Improving the quality of functioning of the industrial facility air conditioning system]. *Kachestvo produkci: kontrol', upravlenie, povyshenie, planirovanie. Sbornik nauchnykh trudov* [Product quality: control, management, improvement, planning. Collection of proceedings 3 Intern. youth scientific and practical conference], Kursk, 2016, pp. 28-32 (In Russ.).

11. Kostin V. I., Russkih E. Yu. Raschet moshchnosti sistem ohlazhdeniya pomeshchenij [Calculation of the cold consumption in air conditioning systems for industrial buildings]. *AVOK: ventilyaciya, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika = Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal*, 2012, no. 5, pp. 18-23 (In Russ.).

12. Miroshnichenko S.T., Puhlij V. A., Potekhin V. G., Sokolov V. V., Glushkova E. V., Zhuravlev A. A., Pantel' V. O. [Industrial air conditioning Systems of the chiller-fan coil type and energy-saving systems]. *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'. Sbornik statei*. [Environmental, industrial and energy security. Collection of articles based on the materials of the international journal. scientific and practical conferences]. Sevastopol', 2018, pp. 807-816 (In Russ.).

13. Lyovin V. Proektirovanie promyshlennykh sistem kondicionirovaniya [Design of industrial air conditioning systems]. *Santekhnika. Otoplenie. Kondicionirovanie = Plumbing. Heating. Conditioning*, 2012, no. 10(130), pp. 69-73.

14. Kostin V. I., Russkih E. YU. Problemy rascheta raskhodov holoda na sistemy kondicionirovaniya vozduha promyshlennykh zdaniy [Problems of calculation of expenses of cold on systems air conditioning of industrial buildings]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2012, no. 5(641), pp. 60-64 (In Russ.).

15. Sheps R. A., SHashin A. V., ZHerlykina M. N., SHichkin V. V. Opredelenie energeticheskoy effektivnosti mekhanicheskoy ventilyacii pomeshchenij s vydeleniem vrednykh veshchestv [The definition of energy efficiency mechanical ventilation with emissions].

Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura = Housing and utilities infrastructures, 2019, no. 2(9), pp. 62-68 (In Russ.).

16. Strahova N. A., Glazunova E. K. *Ventilyaciya* [Ventilation]. Rostov-na-Donu, 2014, 46 p. (In Russ.).

17. Grititlin A. M., Dacyuk T. A. *Otoplenie i ventilyaciya proizvodstvennyh pomeshchenij* [Heating and ventilation of industrial premises], St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2007, 399 p. (In Russ.).

18. Lugovskij S. I., Dymchuk G. K. *Sovershenstvovanie sistem pro-myshlennoj ventilyacii* [Improvement of industrial ventilation systems]. Moscow, Strojizdat Publ., 1991, 130 p. (In Russ.).

19. Posohin V. N. *Raschet mestnyh otsosov ot teplo- i gazovydelyayushchego oborudovaniya* [Calculation of local suction from heat and gas-releasing equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984, 157 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Жерлыкина Мария Николаевна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
жилищно-коммунального хозяйства,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
г. Воронеж, Российская Федерация,
e-mail: zherlykina@yandex.ru,
ORCID 0000-0001-5688-3277

Mariya N. Zherlykina, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor of Housing and
Communal Services Department,
Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russian Federation,
e-mail: zherlykina@yandex.ru,
ORCID 0000-0001-5688-3277

Щукина Татьяна Васильевна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет»,
г. Воронеж, Российская Федерация,
e-mail: zherlykina@yandex.ru

Tatiana V. Shchukina, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor,
Voronezh State Technical University,
Voronezh, Russian Federation,
e-mail: zherlykina@yandex.ru

Гурбангулыев Арслан,
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет»,
г. Воронеж, Российская Федерация,
e-mail: zherlykina@yandex.ru

Arslan Gurbangulyev, Voronezh State Technical
University, Voronezh, Russian Federation,
e-mail: zherlykina@yandex.ru

Применение модели скоростной кластеризации пикселей в задачах предобработки изображений дистанционного зондирования Земли

И. Г. Ханьков ¹ ✉

¹ Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
14 линия В.О. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

✉ e-mail: igk@iias.spb.su

Резюме

Цель исследования заключается в применении модифицированного метода Уорда в скоростной обработке полноразмерных изображений дистанционного зондирования Земли.

Методы. Классический метод Уорда модифицируется путем разделения вычислительного процесса на три последовательных этапа. На первом этапе строится грубая иерархия приближений. На втором этапе выполняется промежуточное улучшение качества заданного разбиения при фиксированном числе цветов. Третий этап кластеризует полученные суперпиксели классическим методом Уорда. Программно-алгоритмический инструментарий составляют четыре операции над кластерами пикселей и сегментами изображения: слияние пары кластеров в один, разделение кластера на два исходных, выделение подмножества пикселей в отдельный кластер и реклассификация части пикселей путем исключения из одного кластера и отнесения их в другой. Оценкой качества служит суммарная квадратичная ошибка. Улучшение качества разбиения изображения обеспечивается итеративным исполнением сочетания операций слияния и разделения кластеров пикселей, в частности сегментов изображения. Один из кластеров (сегментов) разделяется надвое и пара других несовпадающих с ним объединяется в один по критерию минимального приращения суммарной квадратичной ошибки.

Результаты. Предложенный модифицированный метод Уорда применен в обработке полноразмерных изображений дистанционного зондирования Земли, взятых из базы данных Института обработки сигналов и изображений Южно-Калифорнийского университета. Сопоставлены результаты обработки в режимах чистой сегментации и кластеризации.

Заключение. Предложенная модель кластеризации пикселей пригодна для скоростной обработки полноразмерных изображений. Кластеризация пикселей по сравнению с сегментацией изображений позволяет более детально определить как контуры объектов интереса, так и их внутреннюю структуру.

Ключевые слова: сегментация изображений; кластеризация пикселей; скоростная кластеризация; суперпиксели, иерархия приближений.

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

Для цитирования: Ханьков И. Г. Применение модели скоростной кластеризации пикселей в задачах предобработки изображений дистанционного зондирования Земли // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 90-107. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-90-107>.

Поступила в редакцию 30.10.2019

Подписана в печать 06.02.2020

Опубликована 20.04.2020

Application of the Pixel Velocity Clustering Model in the Tasks of Preprocessing images of Earth Remote Sensing

Igor G. Khanykov ¹ ✉

¹ St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS)
39, 14-th Line V.O., St. Petersburg 199178, Russian Federation

✉ e-mail: igk@iiias.spb.s

Abstract

Purpose of research is to apply the modified Ward method in high-speed processing of full-size images of Earth remote sensing.

Methods. The classical Ward method is modified by dividing the computational process into three successive stages. At the first stage, a rough hierarchy of approximations is built. At the second stage, an intermediate improvement of the quality of the given partition is performed for a fixed number of colours. At the third stage, the obtained superpixels are clustered using the classical Ward method. The software-algorithmic toolkit consists of four operations on pixel clusters and image segments: merging a pair of clusters into one, dividing a cluster into two original ones, singling out a subset of pixels into a separate cluster and reclassifying some pixels by excluding them from one cluster and assigning them to another. The quality is assessed by the total squared error. Improving the image decomposition quality is ensured by iterative execution of a combination of merging and dividing pixel clusters, image segments, in particular. One of the clusters (segments) is divided in two and a couple of others non-coincident with it are combined into one according to the criterion of minimum increment of the total squared error.

Results. The proposed modified Ward method is applied in the processing of full-size images of Earth remote sensing taken from the database of the USC Signal and Image Processing Institute. The results of processing in the modes of pure segmentation and clustering are compared.

Conclusion. The proposed pixel clustering model is suitable for high-speed processing of full-size images. Pixel clustering in comparison with image segmentation makes it possible to define in more detail both the contours of objects of interest and their internal structure.

Keywords: image segmentation; pixel clusterization; high-speed clustering; superpixels, hierarchy of approximations.

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

For citation: Khanykov I. G. Application of the Pixel Velocity Clustering Model in the Tasks of Preprocessing images of Earth Remote Sensing // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 90-107 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-90-107>.

Received 30.10.2019

Accepted 06.02.2020

Published 20.04.2020

Введение

Сегментация относится к стадии предварительной обработки изображений. Она заключается в разбиении изображения на непересекающиеся области на основе однородности характеристик (яркости или цвета пикселей). Сегментация применима во многих практических областях, включая дистанционное зондирование Земли. Один из распространенных подходов к сегментации спутниковых изображений основан на использовании алгоритмов кластеризации данных.

Среди классических методов кластеризации данных особо выделяются методы Уорда [1], Оцу [2], К-средних [3] и модель сегментации Мамфорда-Шаха [4, 5]. Эти методы хорошо известны. Существует множество модификаций. Например, в работе [6] представлен новый метод генерации центра кластера путем уменьшения среднеквадратичной ошибки конечного кластера без значительного увеличения времени выполнения метода К-средних. В работах [7, 8] совершенствуется механизм нахождения начальных центроидов, обеспечивающий эффективное назначение точек подходящим кластерам. В работе [9] совмещается кластеризация методом К-средних с методом нечеткой логики С-средних. В работе [10] совмещаются методы нечеткой логики с методами пороговой обработки. В ней также представлена классифика-

ция пороговых методов сегментации изображений. В работе [11] преодолевается сложность модели Мамфорда-Шаха за счет замены кусочно-гладкой функции кусочно-постоянной функцией.

В работе [12], посвященной выбору характеристик гиперспектральных изображений для пространственной и спектральной кластеризации методом нечеткой логики С-средних, метод Уорда используется в качестве агломеративного алгоритма построения иерархии, в которой каждая спектральная полоса рассматривается как кластер. Итеративный процесс объединения повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто желаемое количество кластеров. В работе [13] применяются методы кластеризации для выделения однородных областей водоразделов в задачах дистанционного зондирования. Метод Уорда, продемонстрировавший превосходные по качеству результаты, был применен для формирования двумерной карты объектов. В работе [14] предлагается алгоритм распознавания областей лунных морей на основе метода Уорда.

Несмотря на то, что метод Уорда возвращает результаты приемлемого качества по суммарной квадратичной ошибке, он используется в обработке изображений ограничено из-за высокой вычислительной сложности.

В работе [15] приведены особенности кластеризации спутниковых изображений, среди которых выделяют:

– большой объем данных;

- отсутствие априорной информации о количестве и вероятностных характеристиках классов;

- наличие «шума» и выбросов в данных.

К «хорошим» алгоритмам выдвигают требования:

- низкая вычислительная сложность;

- выделение кластеров любой структуры;

- выделение заранее неизвестного числа кластеров;

- обработки данных в присутствии «шума»;

- простота настройки параметров.

В настоящей работе исследуется применение классических методов кластерного анализа [16, 17] для предварительной обработки цифрового изображения на стадии *сегментации*, которая заключается в разбиении исходного изображения на вложенные изображения «объектов» с целью дальнейшего анализа признаков и распознавания. Заполнение каждого вложенного изображения одинаковыми пикселями с усредненным значением яркости преобразует исходное изображение в свое *приближение*. Качество разбиения и соответствующего приближения изображения из N пикселей оценивается по величине среднеквадратичного отклонения σ пикселей приближения от пикселей изображения или суммарной квадратичной ошибки $E=3N\sigma^2$, где коэффициент 3 учитывает число цветовых компонент в изображении. При *сегментации* пиксели каждого

вложенного изображения составляют единственный связный сегмент. При *кластеризации* пикселей допускается, что вложенное изображение может состоять из нескольких или многих несмежных сегментов исходного изображения. Разбиение и приближение при данном числе кластеров пикселей, в частности сегментов изображения, считается *оптимальным*, если отвечает минимально возможному значению суммарной квадратичной ошибки E или среднеквадратичного отклонения σ . Тогда *объекты* определяются как кластеры или сегменты оптимального приближения изображения.

В секции 2 излагается модель скоростной кластеризации пикселей. Приводится типовая блок-схема алгоритма и варианты реализации блоков. Описывается программно-алгоритмический инструментарий модели. В секции 3 излагаются экспериментальные результаты обработки стандартных изображений дистанционного зондирования Земли из международной базы данных (USC-SIPI image database). Обсуждаются результаты кластеризации пикселей и сегментации изображений. Сопоставляются временные затраты на обработку изображений в различных режимах. В секции 4 подводятся итоги проделанной работы.

Материалы и методы

Среди методов кластерного анализа, применимых в обработке изображений, особое место занимает классиче-

ский метод Уорда. Он обрабатывает цветные изображения и возвращает адекватные результаты, но характерная методу высокая вычислительная сложность существенно ограничивает его применение. Приведенная на рис. 1 схема скоростной кластеризации пикселей изображения преодолевает указанный недостаток за счет разделения процесса обработки на три типовых этапа.

Первый этап «а» при помощи операций «merge» (1) и «divide» (3) быстро строит грубую иерархию связных сегментов, генерация которой доступна двумя разными вариантами. Первый вариант – применение модели Мамфорда-Шаха [4, 5], которая заключается в последовательном укрупнении смежных сегментов (на начальных шагах – смежных пикселей). Выбираются такие два смежных сегмента, объединение которых сопровождается минимальным приращением суммарной квадратичной ошибки (3). Второй вариант – разделение изображения на фрагменты регулярной сеткой для их обработки как самостоятельные изображения классическим методом Уорда с последующим объединением иерархий в одну [18].

Второй этап «б» формирует g_0 суперпикселей, фактически, выполняя улучшение качества заданного разбиения при фиксированном числе цветов (кластеров). Для чего разработаны два базовых алгоритма: *SI*-метод (Segmentation Improvement) [19], являющийся сочетанием операций «merge÷» (6), и *K-meanless* метод (метод К-сред-

них-без-средних) [20], реализующий операцию «correct» (5). Множество программных реализаций обусловлено как возможностью комбинированного сочетания пары базовых методов *SI* и *K-meanless* (отдельно, последовательно, циклично), так и версиями самих методов (сегментарная, кластерная).

На третьем этапе «в» выполняется кластеризация суперпикселей методом Уорда [1] (операция «merge» для суперпикселей (1)).

Механизм создания бинарной иерархической последовательности из N разбиений изображения на кластеры пикселей, кодируемой двумя массивами, состоящих, как и исходное изображение, из N элементов каждый, где один массив задает дерево, а второй – циклический граф, подробно описан в работах [18, 21].

Основу программно-алгоритмического инструментария схемы скоростной кластеризации пикселей [22] образуют четыре операции с кластерами пикселей, в частности, с сегментами изображения: операция «merge», операция «divide», операция «split», операция «correct».

Все операции минимизируют суммарную квадратичную ошибку E или среднеквадратичное отклонение σ , связанные равенством:

$$E=3N\sigma^2,$$

где N – число пикселей в изображении; 3 – коэффициент, указывающий число цветовых составляющих.

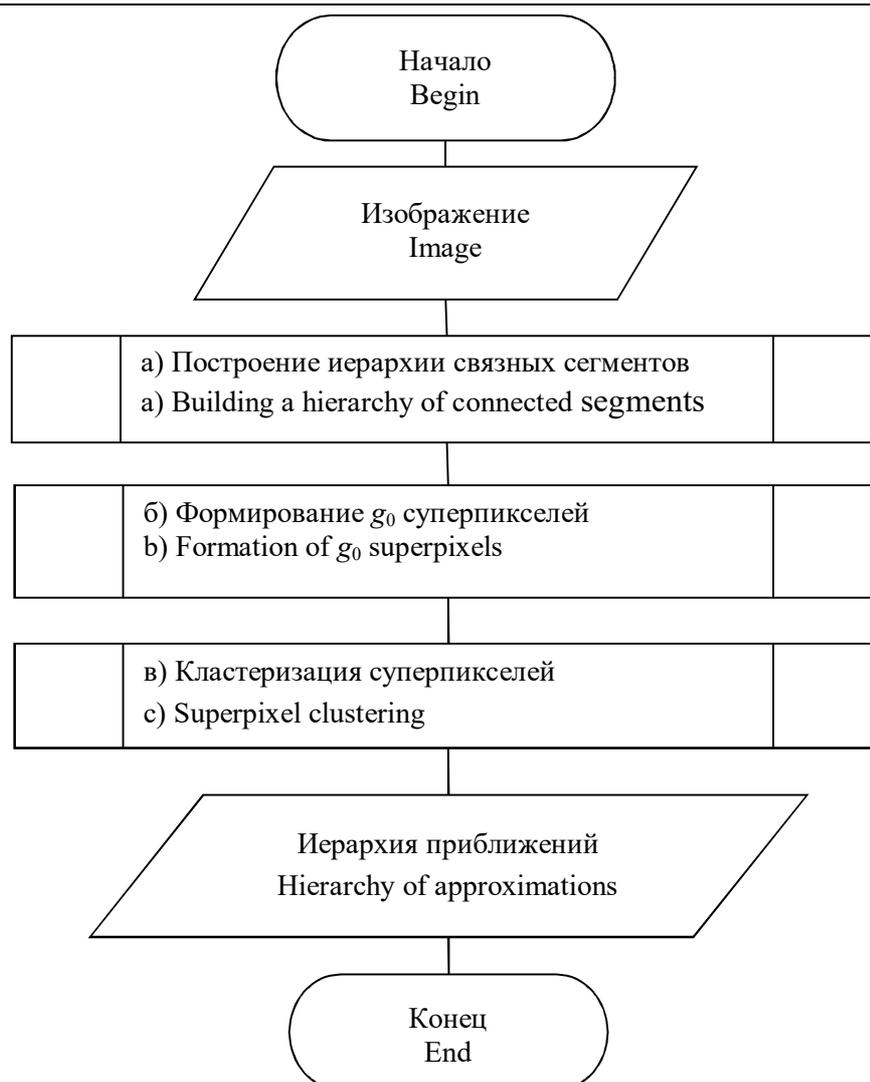


Рис. 1. Трехэтапная блок-схема скоростной кластеризации пикселей изображения

Fig. 1. Three-stage flowchart of the high-speed clustering of the image pixels

Первые две операции («merge» и «divide») используются при построении бинарной иерархии. Пара остальных операций («split» и «correct») используется при ее преобразованиях.

Операция «merge» объединяет кластеры 1 и 2 с числом пикселей n_1 и n_2 соответственно по формуле:

$$\Delta E_{merge} = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} \|I_1 - I_2\|^2, \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – трехкомпонентные средние значения яркостей пикселей кластеров 1 и 2, $\| \|^2$ – квадрат Евклидовой разницы.

Критерием выбора пары кластеров (в частности, сегментов) 1 и 2 из доступного множества пар для последующего объединения служит сопутствующий минимум приращения суммарной квадратичной ошибки:

$$(1, 2) = \arg \min \{ \Delta E_{merge}(1, 2) \}. \quad (2)$$

Операция «divide» разделяет кластер 1 на образующую его пару кластеров 1' и 1'':

$$\Delta E_{divide}(1) \equiv -\Delta E_{merge}(1', 1''). \quad (3)$$

Операция «*split*» выделяет из n_1 пикселей кластера 1 в отдельный кластер любое подмножество из $k < n_1$ пикселей:

$$\Delta E_{split} = -\frac{kn_1}{n_1 - k} \|I - I_1\|^2, \Delta E_{split} \leq 0, (4)$$

где I_1 и I – трехкомпонентные средние яркости обсуждаемых n_1 и k пикселей. Выделение в отдельный кластер пикселей сопровождается отрицательным приращением суммарной квадратичной ошибки, то есть уменьшением суммарной квадратичной ошибки всего разбиения.

Операция «*correct*» является комбинацией операций «*split*» и «*merge*». Она реклассифицирует пиксели посредством их исключения из кластера 1 и отнесения к кластеру 2:

$$\Delta E_{correct} = \frac{kn_2}{n_2 + k} \|I - I_2\|^2 - \frac{kn_1}{n_1 - k} \|I - I_1\|^2, (5)$$

где I – среднее значение реклассифицируемых k пикселей, а I_1 , I_2 – средние значения пикселей кластеров 1 и 2 с числом пикселей n_1 и n_2 соответственно.

Поскольку объединение множеств пикселей k и n_2 сопровождается приращением суммарной квадратичной ошибки (первое слагаемое формулы (5)), а извлечение множества $k < n_1$ пикселей из множества пикселей n_1 сопровождается уменьшением ее значения (второе слагаемое формулы (5)), то пара кластеров 1, 2 и множество $k < n_1$ пикселей выбирается из условия максимального падения значения суммарной квадратичной ошибки:

$$(1, 2, k) = \arg \min \Delta E_{correct} (1, 2, k), \Delta E_{correct} \leq 0.$$

Сочетание операций «*merge÷*» обеспечивает улучшение качества приближения изображения в методе сегментации «*SI*» (segmentation improvement) за счет разделения надвое одного из сегментов (под номером 1) и слияния несовпадающих с ним двух других (с номерами 2 и 3), которое выполняется итеративно по критерию [19]:

$$\begin{aligned} \Delta E(1, 2, 3) &= \Delta E_{divide}(1) + \Delta E_{merge}(2, 3); \\ (1, 2, 3) &= \arg \min (\Delta E(1, 2, 3)); \\ \Delta E(1, 2, 3) &< 0. \end{aligned} (6)$$

На каждой итерации выбирается тройка сегментов, обеспечивающих максимальное падение суммарной квадратичной ошибки, и процесс комбинированного слияния/разделения смежных сегментов продолжается, пока обнаруживаются тройки сегментов, удовлетворяющие условию. В противном случае, обработка завершается. Для приложений *SI*-метода важно, что число сегментов в результирующем приближении совпадает с числом сегментов исходного приближения.

Посредством перечисленных операций и их комбинаций [22] строится бинарная иерархия кластеров или сегментов и формируется иерархическая последовательность квазиоптимальных разбиений изображения на последовательное число кластеров от 1 до N . При этом *иерархия* кластеров (сегментов) считается заданной, если для каждого кластера не менее, чем из одного пикселя, устанавливается пара кластеров, на которые разделяется данный кластер.

Результаты и их обсуждение

Применение схемы скоростной кластеризации пикселей демонстрируется обработкой снимков дистанционного зондирования Земли, взятых из базы данных Института обработки сигналов и изображений Южно-Калифорнийского университета (Signal and Image Processing Institute, University of Southern California: <http://sipi.usc.edu/database/>). На рис. 2 приведено исходное изображение планеты Земля.



Рис. 2. Исходное изображение 2.1.11 «Earth from space» размером 512x512 пикселей

Fig. 2. The original image 2.1.11 "Earth from space" size of 512x512 pixels

На сериях рис. 3 и рис. 4 иллюстрируются пикселей и сегментации изображения. Под каждым рисунком отмечено число кластеров/сегментов, на которое разбивается исходное изображение, а также значение суммарной квадратичной ошибки, характеризующей качества данного разбиения. Чем меньше ее значение, тем качество разбиения лучше. Заметим, что кластеризация пикселей дает существенно большее падение значения ошибки аппроксимации, чем процедура сегментации. Это видно, сопоставляя каждое очередное разбиение изображения.

На рис. 5 изображен исходный снимок аэропорта в Сан-Диего. На серии рис. 6 и рис. 7 приведены результаты кластеризации пикселей и сегментации изображений.

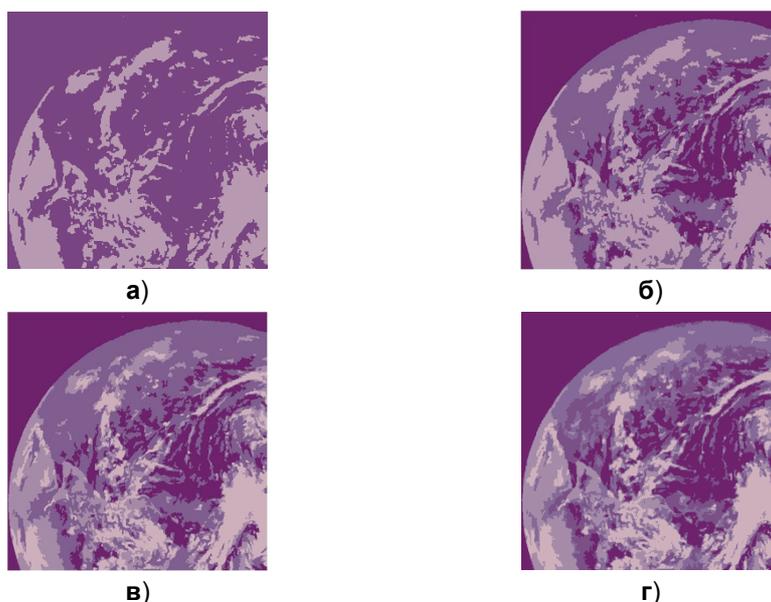


Рис. 3. Кластеризация пикселей, $N_{sp}=1000$: **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=24,14763$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=17,15115$; **в** – $N_{кл}=4$, $\sigma=14,42725$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=13,13059$

Fig. 3. Pixel clustering, $N_{sp}=1000$): **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=24,14763$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=17,15115$; **в** – $N_{кл}=4$, $\sigma=14,42725$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=13,13059$

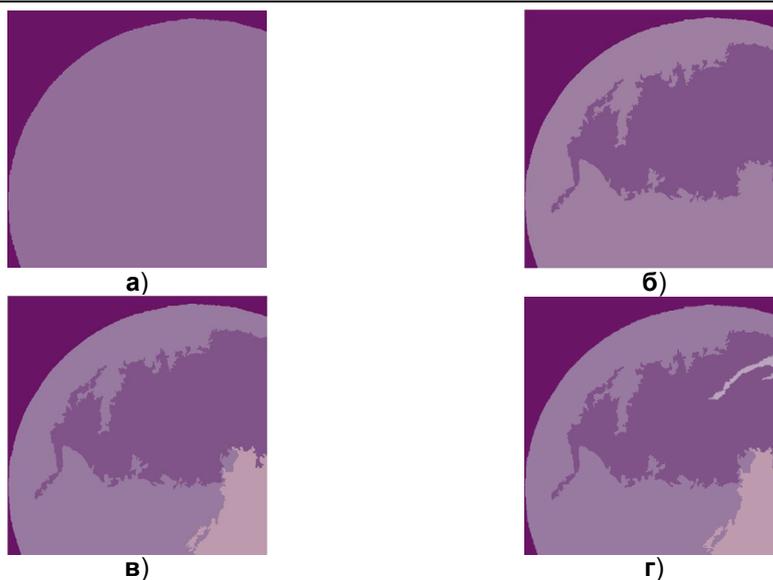


Рис. 4. Сегментация изображений, $N_{сп}=1$: **а** – $N_{сг}=2$, $\sigma=32,58404$; **б** – $N_{сг}=3$, $\sigma=29,19237$; **в** – $N_{сг}=4$, $\sigma=28,17634$; **г** – $N_{сг}=5$, $\sigma=27,40356$

Fig. 4. Image segmentation, $N_{sp}=1$: **a** – $N_{cg}=2$, $\sigma=32,58404$; **б** – $N_{cg}=3$, $\sigma=29,19237$; **в** – $N_{cg}=4$, $\sigma=28,17634$; **г** – $N_{cg}=5$, $\sigma=27,40356$



Рис. 5. Исходное изображение 2.1.05 «San Diego (North Island NAS)» размером 512x512 пикселей

Fig. 5. Original image 2.1.05 "San Diego (North Island NAS)" size of 512x512 pixels

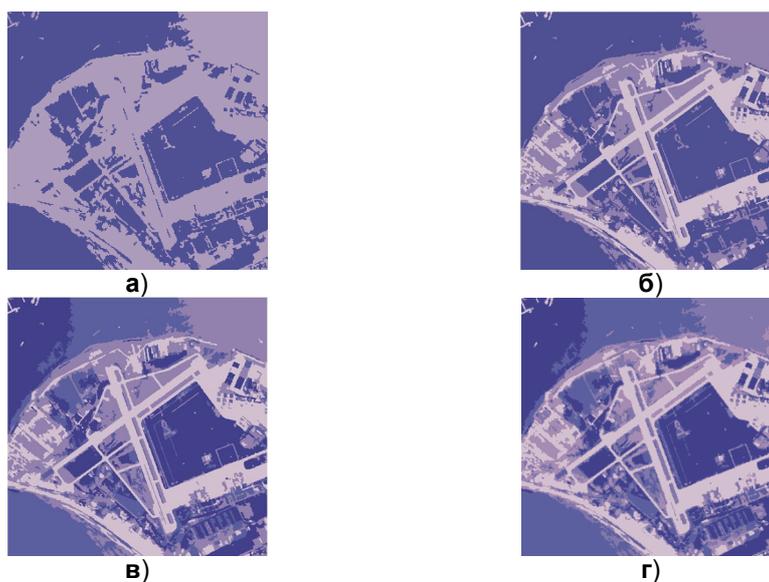


Рис. 6. Кластеризация пикселей, $N_{сп}=1000$: **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=28,64477$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=20,93470$; **в** – $N_{кл}=4$, $\sigma=18,86713$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=17,67230$

Fig. 6. Кластеризация пикселей, $N_{sp}=1000$: **a** – $N_{cl}=2$, $\sigma=28,64477$; **б** – $N_{cl}=3$, $\sigma=20,93470$; **в** – $N_{cl}=4$, $\sigma=18,86713$; **г** – $N_{cl}=5$, $\sigma=17,67230$

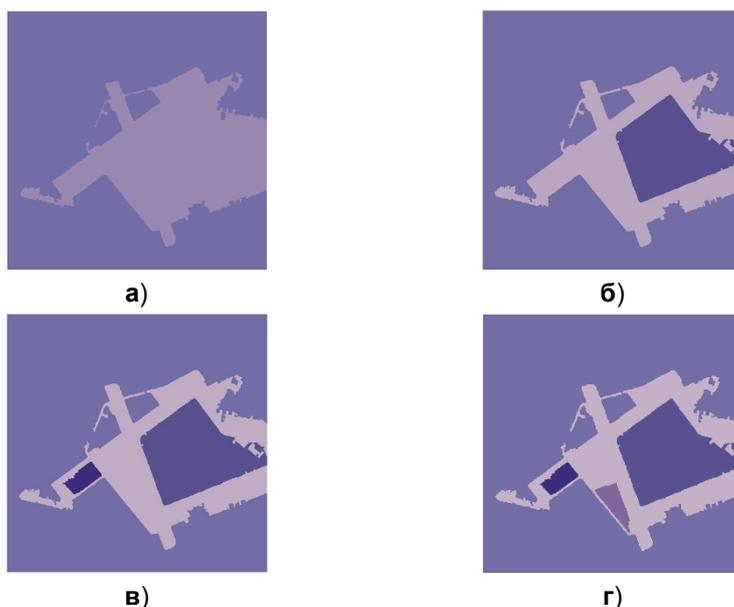


Рис. 7. Сегментация изображений, $N_{сп}=1$: **а** – $N_{сг}=2$, $\sigma=44,86318$; **б** – $N_{сг}=3$, $\sigma=39,58331$;
в – $N_{сг}=4$, $\sigma=38,16740$; **г** – $N_{сг}=5$, $\sigma=37,62308$

Fig. 7. Image segmentation, $N_{sp}=1$: **a** – $N_{cg}=2$, $\sigma=44,86318$; **б** – $N_{cg}=3$, $\sigma=39,58331$;
в – $N_{cg}=4$, $\sigma=38,16740$; **г** – $N_{cg}=5$, $\sigma=37,62308$

На рис. 8 приведен аэрокосмический снимок Пентагона в оттенках серого. На серии рис. 9 с каждым очередным разбиением детали здания проявляются более отчетливо, чем на аналогичной серии сегментаций рис. 10.

На рис. 11 изображен Вашингтон в инфракрасном спектре. На серии рис. 12 и 13 приведены результаты кластеризации пикселей и сегментации изображения. Уже на втором кластеризованном разбиении (рис. 11а) просматриваются детали подстилающей поверхности и очертания реки.

В табл. приводятся значения временных затрат на обработку представленных в работе изображений в различных режимах: кластеризации пикселей и сегментации изображений. В первом столбце указано наименование стан-

дартного тестового изображения из открытой базы данных SIPI. Во втором столбце указан размер стороны изображения в пикселях. Все изображения квадратные. В третьем столбце задается $N_{сп}$ число суперпикселей – параметр детализации, который принимает значения в диапазоне от 1 до N числа пикселей в изображении всего.



Рис. 8. Исходное изображение 3.2.25 «Pentagon», размером 1024x1024 пикселей

Fig. 8. Original image 3.2.25 "Pentagon", 1024x1024 pixels in size

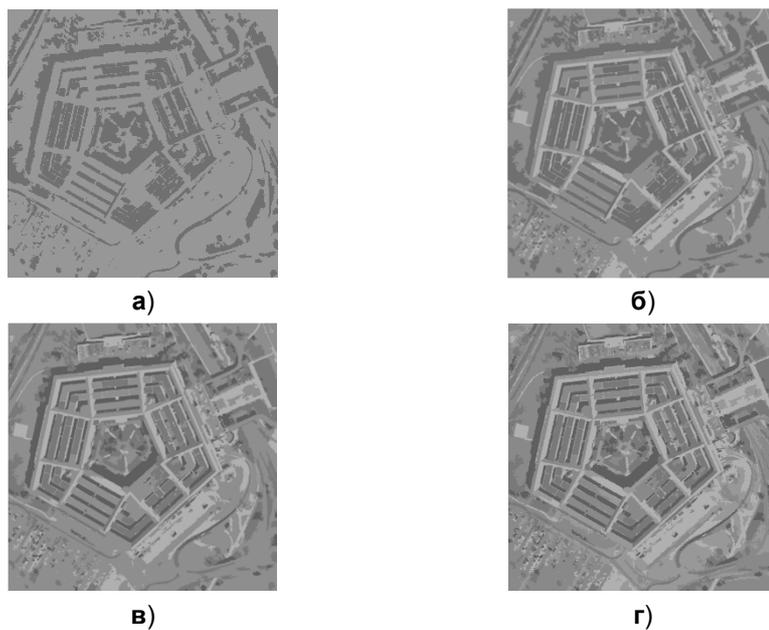


Рис. 9. Кластеризация пикселей, $N_{sp}=1000$: **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=0,94362$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=17,12895$;
в – $N_{кл}=4$, $\sigma=15,50541$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=14,59845$

Fig. 9. Pixel clustering, $N_{sp}=1000$: **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=0,94362$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=17,12895$;
в – $N_{кл}=4$, $\sigma=15,50541$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=14,59845$

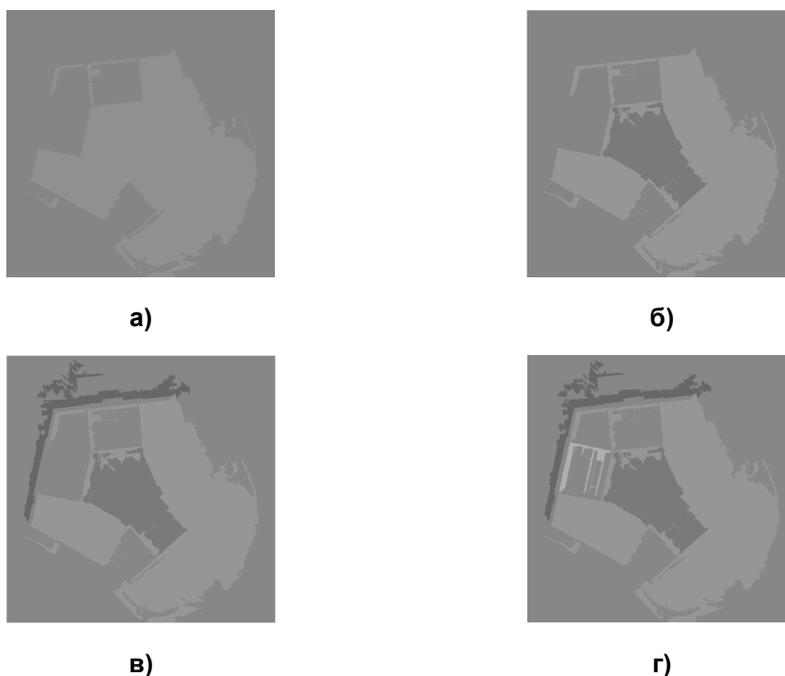


Рис. 10. Сегментация изображений, $N_{sp}=1$: **а** – $N_{сп}=1$: $N_{сг}=2$, $\sigma=27,29347$; **б** – $N_{сг}=3$,
 $\sigma=26,43707$; **в** – $N_{сг}=4$, $\sigma=25,71989$; **г** – $N_{сг}=5$, $\sigma=25,47795$

Fig. 10. Image segmentation, $N_{sp}=1$: **а** – $N_{сп}=1$: $N_{сг}=2$, $\sigma=27,29347$; **б** – $N_{сг}=3$, $\sigma=26,43707$;
в – $N_{сг}=4$, $\sigma=25,71989$; **г** – $N_{сг}=5$, $\sigma=25,47795$

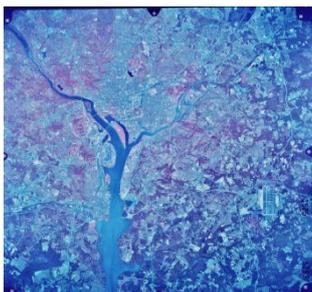


Рис.11. Исходное изображение wash-ir «Washington D.C. (infra-red)» размером 2250x2250 пикселей

Fig. 11. Original Image wash-ir "Washington D.C. (infra-red)" size of 2250x2250 pixels

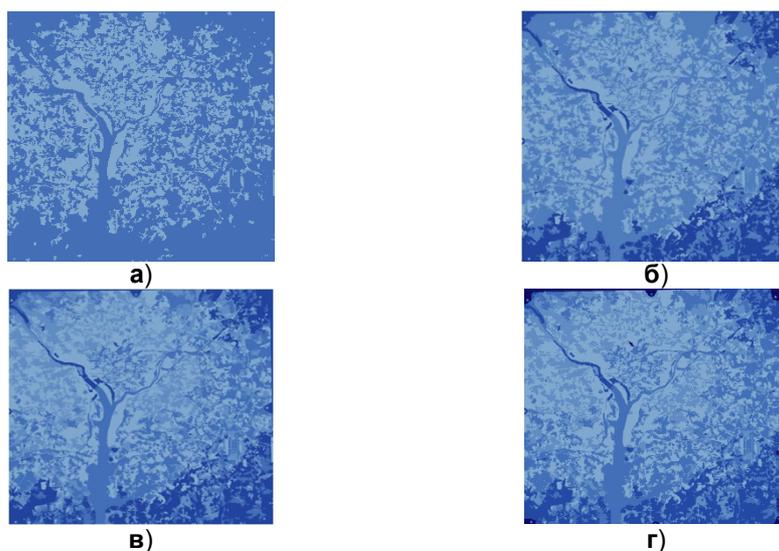


Рис. 12. Кластеризация пикселей, $N_{sp}=1000$: **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=36,29479$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=32,73039$; **в** – $N_{кл}=4$, $\sigma=31,51019$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=30,90131$

Fig.12. Pixel clustering, $N_{sp}=1000$: **а** – $N_{кл}=2$, $\sigma=36,29479$; **б** – $N_{кл}=3$, $\sigma=32,73039$; **в** – $N_{кл}=4$, $\sigma=31,51019$; **г** – $N_{кл}=5$, $\sigma=30,90131$

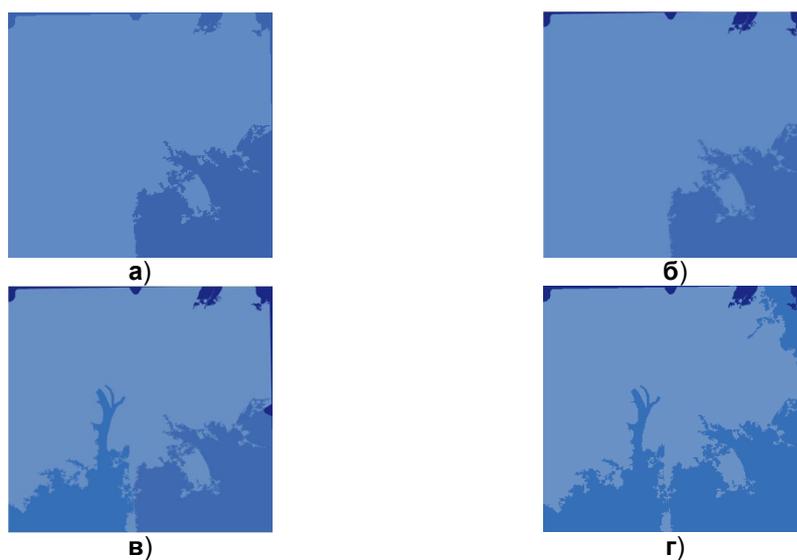


Рис. 13. Сегментация изображений, $N_{sp}=1$: **а** – $N_{сг}=2$, $\sigma=36,29479$; **б** – $N_{сг}=3$, $\sigma=32,73039$; **в** – $N_{сг}=4$, $\sigma=31,51019$; **г** – $N_{сг}=5$, $\sigma=30,90131$

Fig. 13. Image segmentation, $N_{sp}=1$: **а** – $N_{сг}=2$, $\sigma=36,29479$; **б** – $N_{сг}=3$, $\sigma=32,73039$; **в** – $N_{сг}=4$, $\sigma=31,51019$; **г** – $N_{сг}=5$, $\sigma=30,90131$

При значении $N_{сп}=1$ программа работает в режиме чистой сегментации, рассматривая только пары смежных пикселей как в модифицированной модели Мамфорда-Шаха [4, 5, 22]. Аналогично, при $N_{сп}=N$ программа работает в режиме чистой кластеризации с квадратичной вычислительной сложностью как в классическом методе Уорда [1]. Практика показывает, что компромисс-

ного значения $N_{сп}=1000$ достаточно для выделения деталей объекта без потери времени на обработку изображения. В четвертом, пятом, шестом столбцах приводятся временные затраты и скорости обработки изображения на каждом этапе алгоритма. В крайне правом седьмом столбце приводится общее время работы алгоритма для обработки изображения в заданном режиме.

Таблица. Сопоставление временных затрат в режимах кластеризации пикселей и сегментации изображений

Table. Comparison of time costs in pixel clustering and image segmentation modes

Изображение	Размер стороны	$N_{сп}$	Этап «а»	Этап «б»	Этап «в»	T, c
			t, c	t, c	t, c	
			$v, \text{пикс./с}$	$v, \text{пикс./с}$	$v, \text{пикс./с} / v, \text{pix./sec.}$	
2.1.11 «Earth from space»	512	1	8,790			8,7900
			29823			
2.1.11 «Earth from space»	512	1000	9,046	0,023;	1,305	10,374
			28979	11397565	200877	
2.1.05 «San Diego (North Island) NAS»	512	1	13,024			13,024
			20128			
2.1.05 «San Diego (North Island) NAS»	512	1000	14,825	0,009	0,523	15,557
			17683	29127111	501231	
3.2.25 Pentagon	1024	1	60,627			60,627
			17296			
3.2.25 Pentagon	1024	1000	59,832	0,041	1,61	61,484
			17525	25575024	650885	
wash-ir Washington D.C. (in-fra-red)	2250	1	202,862			202,862
			24955			
wash-ir Washington D.C. (in-fra-red)	2250	1000	206,872	0,061	0,909	207,842
			24472	82991803	5569307	

Выводы

В работе приведена модель вычислительного процесса по преодолению вычислительной сложности, характерной классическому методу Уорда. Описываются варианты реализации путей ее преодоления. Особенность предлагаемой модели заключается в обходе вычислительной сложности за счет разделения процесса на три последовательных этапа. Возможности модели ско-

ростной кластеризации пикселей продемонстрированы на примере обработки изображений дистанционного зондирования Земли. В качестве основных результатов приведены обработанные изображения дистанционного зондирования Земли. Кластеризация пикселей по сравнению с сегментацией изображений позволяет более детально определить как контуры объектов интереса, так и их внутреннюю структуру.

Список литературы

1. Ward J.H., Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 1963. 58(301): 236–244. <http://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>.
2. Otsu N.A. Threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.* 1979. 9(1): 62–66. <http://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
3. Lloyd S.P. Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory.* 1957/1982. 28(2): 129–137. <http://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>.
4. Mumford D., Shah J. Boundary detection by minimizing functionals. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 1985. 17: 137–154.
5. Mumford D., Shah J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems. *Communications on pure and applied mathematics.* 1989. 42(5): 577–685. <http://doi.org/10.1002/cpa.3160420503>.
6. Purohit P., Joshi R.A. New Efficient Approach towards k-means Clustering Algorithm. *In International Journal of Computer Applications.* 2013. 65(11): 125–129. <https://pdfs.semanticscholar.org/99bb/dc0435b10476f61a778e0ab00301704c647c.pdf>
7. Yedla M., Pathakota S.R., Srinivasa T.M. Enhanced K-means Clustering Algorithm with Improved Initial Center. *In International Journal of Science and Information Technologies.* 2010. 1(2): 121–125. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.421.7070&rep=rep1&type=pdf>
8. Nazeer K.A.A., Sebastian M. P. Improving the Accuracy and Efficiency of the k-means Clustering Algorithm. *In Proceedings of the World Congress on Engineering.* 2009. https://www.researchgate.net/profile/K_A_Nazeer/publication/44260003_Improving_the_Accuracy_and_Efficiency_of_the_k-means_Clustering_Algorithm/links/0fcfd51356e00827b8000000.pdf

9. Jose A, Ravi S, Sambath M. Brain tumor segmentation using k-means clustering and fuzzy c-means algorithms and its area calculation. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2014. 2(3): 3496-3501.
10. Das A., Sabut S.K. Kernelized fuzzy C-means clustering with adaptive thresholding for segmenting liver tumors. *Proceedings on Computer Science*. 2016. 92: 389–395. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.395>.
11. Chan T. F., Vese L. A. Active contours without edges. *Image processing, IEEE Transactions on*. 2001. 10(2): 266–277. <http://w3.mi.parisdescartes.fr/~lomn/Cours/CV/SeqVideo/Articles/ChanLevelSet.pdf>
12. Salem M.B., Etabaa K.S., Bouhlel M.S. Hyperspectral image feature selection for the fuzzy c-means spatial and spectral clustering. In *International Image Processing, Applications and Systems (IPAS) IEEE*. 2016: 1–5. <https://doi.org/doi:10.1109/ipas.2016.7880114>
13. Sardooi E.R., Azareh A., Choubin B., Barkhori S., Singh V.P., Shamshirband S. Applying the remotely sensed data to identify homogeneous regions of watersheds using a pixel-based classification approach. *Applied Geography*. 2019. 111: 102071. <https://doi.org/doi:10.1016/j.apgeog.2019.102071>
14. Xie T, Jiang H, Wang J, Tian X., Xu A.A. A new recognition algorithm of the lunar mare area basing on the DEM contrast. In *International Conference on Advanced Materials and Engineering Structural Technology (2015 Apr 25)*. https://www.researchgate.net/profile/Junlin_Wang2/publication/295819542_A_new_recognition_algorithm_of_the_lunar_mare_area_based_on_the_DEM_contrast/links/56cdbc2408ae85c8233e66f1/A-new-recognition-algorithm-of-the-lunar-mare-area-based-on-the-DEM-contrast.pdf
15. Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений // *Вестник КемГУ*. 2012. 4(52): 110–125. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/algoritmy-klasterizatsii-v-zadachah-segmentatsii-sputnikovyh-izobrazheniy>
16. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
17. Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. 176 с.
18. Харинов М.В., Ханыков И.Г. Применение метода Уорда для кластеризации пикселей цифрового изображения // *Вестник БГУ. Математика, информатика*. 2016. 4: 34–42. <http://doi.org/10.18101/2304-5728-2016-4-34-42>.
19. Харинов М.В., Ханыков И.Г. Оптимизация кусочно-постоянного приближения сегментированного изображения // *Труды СПИИРАН*. 2015. 3(40): 183–202. <https://doi.org/10.15622/sp.40.12>.
20. Khanykov I.G., Kharinov M.V., Patel C. Image segmentation improvement by reversible segment merging. 2017 International Conference on Soft Computing and its Engineering Applications (icSoftComp). IEEE, 2017. <http://doi.org/10.1109/ICSOFTCOMP.2017.8280096>

21. Харинов М.В. Кластеризация пикселей иерархически структурированного изображения // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2019. 17(5): 30–43. <http://doi.org/10.18127/j20700814-201905-05>.

22. Харинов М.В. Обобщение трех подходов к оптимальной сегментации цифрового изображения // *Труды СПИИРАН*. 2013. 2(25): 294–316. <http://www.mathnet.ru/links/d13b2a4e766e53f82eb216ba6367bf29/trspsy552.pdf>

References

1. Ward J.H., Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.*, 1963, no. 58(301), pp. 236–244. <http://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>.

2. Otsu N.A. Threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, no. 9(1), pp. 62–66. <http://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.

3. Lloyd S.P. Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1957/1982, no. 28(2), pp. 129–137. <http://doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>.

4. Mumford D., Shah J. Boundary detection by minimizing functionals. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1985, no. 17, pp. 137–154.

5. Mumford D., Shah J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems. *Communications on pure and applied mathematics*, 1989, no. 42(5), pp. 577–685. <http://doi.org/10.1002/cpa.3160420503>.

6. Purohit P., Joshi R.A. New Efficient Approach towards k-means Clustering Algorithm. *In International Journal of Computer Applications*, 2013, no. 65(11), pp. 125–129. <https://pdfs.semanticscholar.org/99bb/dc0435b10476f61a778e0ab00301704c647c.pdf>

7. Yedla M., Pathakota S.R., Srinivasa T.M. Enhanced K-means Clustering Algorithm with Improved Initial Center. *In International Journal of Science and Information Technologies*, 2010, no. 1(2), pp. 121–125. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.421.7070&rep=rep1&type=pdf>

8. Nazeer K.A.A., Sebastian M. P. Improving the Accuracy and Efficiency of the k-means Clustering Algorithm. *In Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2009. https://www.researchgate.net/profile/K_A_Nazeer/publication/44260003_Improving_the_Accuracy_and_Efficiency_of_the_k-means_Clustering_Algorithm/links/0fcfd51356e00827b8000000.pdf

9. Jose A, Ravi S, Sambath M. Brain tumor segmentation using k-means clustering and fuzzy c-means algorithms and its area calculation. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2014, no. 2(3), pp. 3496-3501.

10. Das A., Sabut S.K. Kernelized fuzzy C-means clustering with adaptive thresholding for segmenting liver tumors. *Proceedings on Computer Science*, 2016, no. 92, pp. 389–395. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.395>.

11. Chan T. F., Vese L. A. Active contours without edges. *Image processing, IEEE Transactions on*. 2001, no. 10(2), pp. 266–277. <http://w3.mi.parisdescartes.fr/~lomn/Cours/CV/SeqVideo/Articles/ChanLevelSet.pdf>
12. Salem M.B., Etabaa K.S., Bouhlel M.S. Hyperspectral image feature selection for the fuzzy c-means spatial and spectral clustering. In *International Image Processing, Applications and Systems (IPAS) IEEE*. 2016: 1–5. <https://doi.org/doi:10.1109/ipas.2016.7880114>
13. Sardooi E.R., Azareh A., Choubin B., Barkhori S., Singh V.P., Shamshirband S. Applying the remotely sensed data to identify homogeneous regions of watersheds using a pixel-based classification approach. *Applied Geography*. 2019. 111: 102071. <https://doi.org/doi:10.1016/j.apgeog.2019.102071>
14. Xie T, Jiang H, Wang J, Tian X., Xu A.A. A new recognition algorithm of the lunar mare area basing on the DEM contrast. In *International Conference on Advanced Materials and Engineering Structural Technology* (2015 Apr 25). https://www.researchgate.net/profile/Junlin_Wang2/publication/295819542_A_new_recognition_algorithm_of_the_lunar_mare_area_based_on_the_DEM_contrast/links/56cdbc2408ae85c8233e66f1/A-new-recognition-algorithm-of-the-lunar-mare-area-based-on-the-DEM-contrast.pdf
15. Pestunov I.A., Sinyavskiy Yu.N. Algoritmy klasterizatsii v zadachakh segmentatsii sputnikovykh izobrazhenii [Clustering Algorithms in Satellite Images Segmentation Tasks]. *Vestnik KemGU = Bulletin of Kemerovo State University*, 2012, no. 4(52), pp. 110–125 (in Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/algoritmy-klasterizatsii-v-zadachah-segmentatsii-sputnikovykh-izobrazheniy>.
16. Aivazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* [Applied statistics: Classification and reduction of dimension]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989, 607 p. (In Russ.).
17. Mandel' I.D. *Klasternyi analiz* [Cluster Analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1988, 176 p. (in Russ.)
18. Kharinov M.V., Khanykov I.G. Primenenie metoda Uorda dlya klasterizatsii pikselei tsifrovogo izobrazheniya [Utilization of Ward's Method for Clustering of Pixels of Color Image]. *Vestnik BGU. Matematika, informatika = BSU Bulletin. Mathematics, Informatics*, 2016, no. 4, pp. 34–42 (In Russ.) <http://doi.org/10.18101/2304-5728-2016-4-34-42>.
19. Kharinov M.V., Khanykov I.G. Optimizatsiya kusochno-postoyannogo priblizheniya segmentirovannogo izobrazheniya [Optimization of Piecewise Constant Approximation for Segmented Image]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2015, no. 3(40), pp. 183-202 (In Russ.) <https://doi.org/10.15622/sp.40.12>.
20. Khanykov I.G., Kharinov M.V., Patel C. Image segmentation improvement by re-versible segment merging. *2017 International Conference on Soft Computing and its Engineering Applications (icSoftComp). IEEE*, 2017, <http://doi.org/10.1109/ICSOFTCOMP.2017.8280096>.

21. Kharinov M.V. Klasterizatsiya pikselei ierarkhicheski strukturirovannogo izobrazheniya. Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy [Clustering of pixels for a hierarchically structured image]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy = Information-measuring and Control Systems*, 2019, no. 17(5), pp. 30–43 (In Russ.). <http://doi.org/10.18127/j20700814-201905-05>.

22. Kharinov M.V. Obobshchenie trekh podkhodov k optimal'noi segmentatsii tsifrovogo izobrazheniya [A generalization of three approaches to an optimal segmentation of digital image]. *Trudy SPIIRAN = Tr. SPIIRAN*, 2013, no. 25, pp. 294–316. (In Russ.). Available at: <http://www.mathnet.ru/links/d13b2a4e766e53f82eb216ba6367bf29/trspy552.pdf>

Информация об авторе / Information about the Author

Ханыков Игорь Георгиевич, магистр техники и технологии, младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: igk@iias.spb.su, ORCID 0000-0001-6284-0839, Researcher ID K-9875-2018,

Igor G. Khanykov, Master of Computer Sciences, Junior Research Officer, St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: igk@iias.spb.su, ORCID 0000-0001-6284-0839, Researcher ID K-9875-2018,

Вариант разграничения доступа к информационным ресурсам на основе неявной аутентификации

А. Л. Марухленко¹ ✉, А. В. Плугатарев¹, М. О. Таныгин¹,
Л. О. Марухленко¹, М. Ю. Шашков¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: проху33@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Цель работы заключается в построении модели системы для эффективной аутентификации мобильных пользователей на основе общедоступных данных пользователя и его поведенческих факторов, а также в исследовании алгоритмов вычисления порогового значения, значения при котором аутентификация пользователя мобильного устройства считается успешной.

Методы. В процессе анализа поведенческих факторов пользователя, которого необходимо аутентифицировать при взаимодействии мобильных устройств, предложены следующие методы вычисления порогового значения. Предложено использование динамических методов определения пороговой величины аутентификации пользователей, основанных на стандартном отклонении и вычислении совокупного среднего балла. Метод, основанный на стандартном отклонении, основан на том, что система делит совокупный поток оценок на несколько блоков одинаково длины, где первый блок используется для обучения, а вычисленный порог используется во втором блоке. Данная последовательность действий повторяется непрерывно, то есть предыдущий блок предоставляет результаты обучения для вычисления порога для текущего блока. Метод вычисления совокупного среднего балла, где вместо использования единого значения общего балла в качестве входных данных, система использует среднее значение текущего блока в качестве входных данных, а новый вычисленный порог используется в качестве порога принятия решения для следующего блока. Предложена математическая модель, обеспечивающая балансирование между скоростью и надёжностью аутентификации мобильных пользователей.

Результаты. Итогом проведенных исследований является разработка эффективного построения системы для вычисления порогового значения успешной аутентификации пользователя мобильного устройства на основе поведенческих особенностей, и адаптирующаяся к изменению поведенческих факторов пользователя. Проведены экспериментальные исследования и сравнения с аналогами, подтверждающие полноту и корректность, а также различные вариации предложенных решений.

Заключение. Предложенный метод неявной аутентификации для управления мобильным доступом легко реализуем, прост в использовании и адаптивен к изменениям входящих данных. Также предложены варианты вычисления порогового значения, при котором неявная аутентификация считается успешно пройденной.

Ключевые слова: разграничение доступа; системный анализ; распознавание; неявная аутентификация; сетевое взаимодействие.

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

© Марухленко А. Л., Плугатарев А. В., Таныгин М. О., Марухленко Л. О., Шашков М. Ю., 2020

Для цитирования: Вариант разграничения доступа к информационным ресурсам на основе неявной аутентификации / А. Л. Марухленко, А. В. Плугатарев, М. О. Таныгин, Л. О. Марухленко, М. Ю. Шашков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 108-121. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-108-121>.

Поступила в редакцию 25.02.2020

Подписана в печать 07.04.2020

Опубликована 20.04.2020

Option of Control of Access to Information Resources Based on Implicit Authentication

Anatoliy L. Marukhlenko ¹ ✉, Aleksey V. Plugatarev ¹, Maksim O. Tanygin ¹,
Leonid O. Marukhlenko ¹, Maksim Yu. Shashkov ¹

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

✉ e-mail: proxy33@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to build a model of a system for effective authentication of mobile users based on public data of the user and his behavioral factors as well as to study algorithms for calculating the threshold value at which the authentication of a mobile device user is considered successful.

Methods. When analyzing the behavioural factors of a user who needs to be authenticated when interacting with mobile devices, application of the following methods for calculating the threshold value are proposed: dynamic methods for determining the threshold value of user authentication based on the standard deviation and the calculation of the aggregate mean score; the method based on the standard when the system divides the aggregate flow of estimates into several blocks of the same length, where the first block is used for training, and the calculated threshold is used in the second block (this sequence of actions is repeated continuously, that is, the previous block provides training results for calculating the threshold for the current block); a method for calculating the aggregate mean score, where instead of using a single total score as input, the system uses the mean value of the current block, and the new calculated threshold is used as the threshold for decision making for the next block. A mathematical model that balances the speed and reliability of mobile users authentication is proposed.

Results. The result of the research is the development of an effective system for calculating the threshold value of successful authentication of a mobile device user based on behavioural features which adapts to changes of the user's behavioural factors. Experimental studies and comparisons with analogs confirming the completeness and correctness were carried out as well as various variants of the proposed solutions.

Conclusion. The proposed method of implicit authentication for mobile access control is easy to implement, easy to use, and adaptive to changes in input data. Options for calculating the threshold value at which implicit authentication is considered successful are also proposed.

Keywords: control access; system analysis; identification; implicit authentication; network interconnection.

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

For citation: Marukhlenko A. L., Plugatarev A.V., Tanygin M.O., Marukhlenko L.O., Shashkov M. Yu. Option of Control of Access to Information Resources Based on Implicit Authentication // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 108-121 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-108-121>.

Received 25.02.2020

Accepted 07.04.2020

Published 20.04.2020

Введение

Мобильные устройства стали незаменимыми в повседневной жизни, предоставляя удобный доступ к онлайн-сервисам, многие из которых включают денежные транзакции и хранение или передачу конфиденциальных данных [1]. В результате они становятся все более привлекательными для злоумышленников, которые могут поставить под угрозу безопасность и конфиденциальность данных, доступ к которым хранится на мобильных устройствах [2-3]. Мобильные устройства особенно уязвимы для потери или физической кражи, поэтому важно иметь эффективный контроль доступа и строгие защитные меры, которые постоянно защищают устройства. Контроль доступа обычно включается аутентификацией пользователя, проверка пользователя на легитимность [4].

Аутентификация с одноразовыми паролями очень неудобна и легко теряется [5]. Аутентификация, включающая биометрические характеристики, такие как лицо и радужная оболочка глаза, отпечаток пальца, голос или речь являются вычислительно дорогими для устройств с ограниченным объемом памяти и энергопотреблением [6].

В целях защиты конфиденциальности пользователей на мобильных устройствах в данной статье предлагается управляемая событиями схема неявной аутентификации. Неявная аутен-

тификация – перспективная альтернатива традиционным методам аутентификации [7]. Например, предложены схемы, основанные на шаблонах поведения пользователя. Баланс между адаптивностью и практической осуществимостью все еще остается проблемой [8-11]. В данной этой статье предлагается управляемая событиями схема, которая включает в себя осведомленность о поведении пользователя через данные повседневного взаимодействия с телефоном.

Чтобы обеспечить работу в режиме реального времени в статье рассматриваются функции поведения пользователя для профилирования пользователей и применяются совокупные оценки и пороговые вычисления для неявной схемы аутентификации [12]. В статье исследуются несколько методов вычисления порогового балла использования схемы для того, чтобы определить уровень доверия текущего пользователя.

Предлагаемая схема предназначена для: работы полностью в фоновом режиме. Затем, полученные значения можно использовать для активации контроля доступа с явной аутентификацией [13].

Данная задача решается в целях защиты конфиденциальности пользователей на мобильных устройствах. В данной статье предлагается управляемая событиями схема неявной аутентификации. Необходимо исследовать несколько методов использования схемы

для распознавания законного поведения пользователя [14]. Исследуемые методы вычисляют совокупную оценку и пороговое значение в режиме реального времени. Чтобы определить уровень доверия текущего пользователя используются данные, полученные в результате предыдущих взаимодействий пользователя с устройством [15]. Разработанная схема должна работать полностью в фоновом режиме, иметь минимальный период получения порогового значения, иметь высокую скорость распознавания пользователей для неявной аутентификации и оперативно обнаруживать ошибки, которые могут использоваться для запуска контроля доступа с явной аутентификацией.

Материалы и методы

1. Метод определения доверительности источника

Предложенная схема аутентификации пользователя моделирует профиль пользователя посредством данных, собранных из повседневного поведения пользователя. Алгоритм оценки применяется для вычисления уровня доверия текущего подключения. Порог принятия решения адаптивно вычисляется, ниже которого явный процесс аутентификации может быть запущен или активирован для обеспечения контроля доступа [16].

Предлагаемый подход использует данные, полученные из событий повседневных пользовательских действий или моделей поведения. Он основан на

общедоступных данных, которые могут быть извлечены из большинства телефонов, для создания профиля пользователя. Будем рассматривать следующие источники информации для неявной схемы аутентификации:

- 1) входящие / исходящие SMS;
- 2) входящий / исходящий телефонный звонок;
- 3) история браузера;
- 4) WIFI история.

Функции, используемые для моделирования профиля пользователя, могут быть представлены следующим образом:

$$F=(f_1+f_2+f_3+..+f_n). \quad (1)$$

Функции для вычисления оценки для каждого источника представлены в виде:

$$Sc=(S_1+S_2+S_3+..+S_n). \quad (2)$$

Таким образом, совокупный балл N, рассчитанный по этой модели, может быть представлен как

$$N= \sum_{i=0}^n S_i(f_i). \quad (3)$$

SMS – сообщения. Каждый раз, когда происходит пересылка SMS-сообщения, система записывает время и отображает номер телефона. Каждому входящему и исходящему номеру телефона присваивается приоритетное значение, рассчитываемое из:

$$K_T=120+(48 \times OT)-t, \quad (4)$$

где OT – обозначает общее количество раз, когда событие произошло; t – время между текущим вычислением и последним вычислением (в часах). С помощью

приведенного выше выражения под-держивается кэш наиболее значимых событий, поскольку любое значение, меньшее нуля, удаляется из списка [17]. OT инициализируется нулем для любого числа, удаленного из списка. Кроме того, формула позволяет удалить из кэша числа, которые были неактивны более недели. Каждый раз, когда происходит новое SMS-событие, система проверяет, были ли выполнены следующие условия при расчете балльной оценки:

Условие 1: система ищет, находится ли этот номер в верхних 5 позициях в списке значений приоритета.

Условие 2: система проверяет, является ли этот номер в списке контактов пользователя.

Оценка определяется следующим образом:

$$S_T = \sum S_{\text{условия}}$$

Звонки. Расчёт ведётся так же, как и в случае SMS-активности, за исключением того, что в расчёт берётся продолжительность телефонного звонка. Долгосрочный вызов является показателем нормального использования, и это принимается в рассмотрение при подсчете баллов.

История браузера. Система извлекает историю браузера и записывает доменное имя каждого посещенного URL. Аналогично функциям SMS и вызовов, список приоритетов поддерживается на основе формулы

$$K_B = 72 + (8 \times OT) - t, \quad (5)$$

где OT представляет общее количество посещений URL; t – интервал в часах между последним посещением и текущим посещением. Кэш наиболее релевантных URL-адресов поддерживается путем удаления отрицательных значений из списка, а OT для удаленного URL-адреса сбрасывается в ноль. Оценка истории браузера вычисляется путем проверки того, сколько недавно посещенных доменов находятся в верхних 6 позициях в списке значений приоритета. Оценка определяется следующим образом:

$$S_B = \sum S_{\text{доменов}} \cdot \quad (6)$$

История WIFI. Система записывает идентификатор набора услуг (SSID) подключенной точки доступа и продолжительность каждого соединения. Список значений приоритета также вычисляется аналогично

$$K_{wf} = 100 + (18 \times OT) - t, \quad (7)$$

где OT обозначает общее количество раз, когда пользователь подключался к определенной точке доступа, а t (в часах) обозначает интервал между временем последнего соединения и текущим временем [18]. Соединения продолжительностью менее двух минут не включаются в вычисления, чтобы избежать использования автоматических коротких соединений с точками доступа. Каждый раз, когда устанавливается новое соединение WIFI, система определяет оценку для истории WIFI, прове

ряя, находится ли она в топ-5 из списка значений приоритета, а затем вычисляет оценку следующим образом:

$$S_B = \sum S_{\text{соединений}} \cdot \quad (8)$$

2. Метод вычисления порогового значения, основанный на оценке среднеквадратичного отклонения

Для вычисления порогового значения в данной системе будем использовать динамические методы определения пороговой величины. Один из подходов основан на оценке стандартного отклонения (рис. 1). Система делит совокупный поток оценок на несколько блоков одинаковой длины ($block_1, \dots, block_n$) длины L . Первый блок используется для обучения, а вычисленный порог используется во втором блоке. Этот шаблон повторяется непрерывно, то есть предыдущий блок предоставляет результаты обучения для вычисления порога для текущего блока. Оценка скорости распознавания данным методом представлена на рис. 1.

3. Метод вычисления порогового значения совокупного среднего балла

Также стоит уделить внимание методу вычисления совокупного среднего балла. Пороговое значение вычисляется по формуле

$$P = \alpha * Z_{t-1} + (1-\alpha) * P_{t-1}, \quad t < 1. \quad (9)$$

Вместо использования единого значения общего балла в качестве входных данных для определения значения порога, система использует среднее значение текущего блока (размер блока b может быть скорректирован в реализации) в качестве входных данных. Новый вычисленный порог используется в качестве порога принятия решения для следующего блока. Например, если исходный индекс AS (совокупного балла) текущего блока равен k , размер блока задается значением b . Значение выражается следующим образом:

$$Z = \frac{\sum_{i=k}^{i=k+b} AS_i}{b}. \quad (10)$$

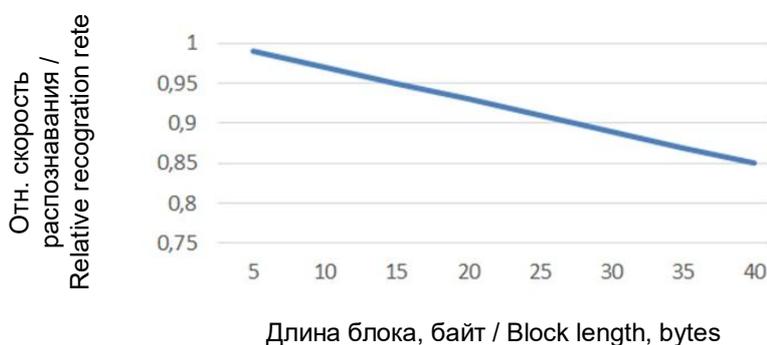


Рис. 1. Зависимость скорости распознавания пользователя от величины блока при использовании метода стандартного отклонения

Fig. 1. Dependence of the user identification rate on the block size when using the standard deviation method

Далее новый вычисленный порог используется в качестве обнаружения порога для следующего блока от AS_{k+b+1} до AS_{k+2b+1} .

Результаты и их обсуждение

1. Результат исследования зависимости скорости аутентификации от различных параметров

Баланс между адаптивностью и практической осуществимостью является одной из задач данного исследования, поэтому необходимо исследовать зависимость скорости аутентификации пользователя от различных параметров.

На рис. 1 показано, что скорость распознавания пользователей уменьшается с увеличением размера блока. Это

связано с алгоритмом стандартного отклонения, который дает порогу больше места для того, чтобы наверстать изменение оценки, когда размер блока меньше [19]. Результат показывает, что блок небольшого размера достигает лучшей производительности при распознавании пользователя.

На рис. 2 показана восходящая динамика скорости распознавания пользователя при увеличении коэффициента. В методе вычисления совокупного балла коэффициент α представляет степень взвешивания. Чем выше α , тем быстрее удаляется старшее наблюдение (порог). Следовательно, высокое значение α подразумевает наиболее высокий уровень распознавания пользователей.

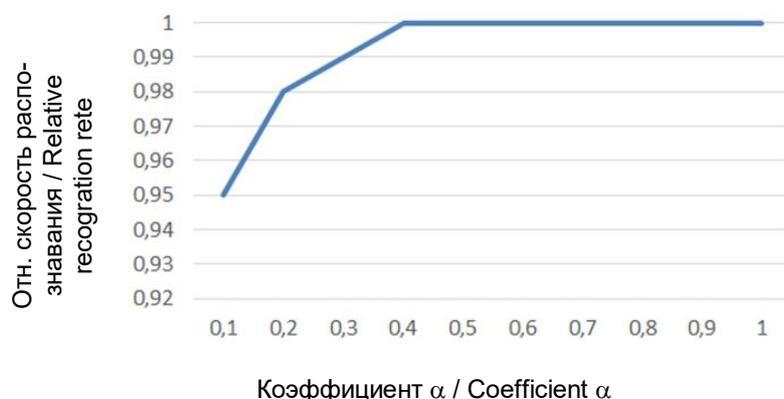


Рис. 2. Зависимость скорости распознавания пользователя от коэффициента α

Fig. 2. Dependence of the user identification rate on coefficient α

2. Сравнение с методом биометрической аутентификации в мобильных взаимодействиях

Надёжным методом также является применение биометрических моделей аутентификации в мобильном оборудо-

вании для вычисления порога. В основе этого метода находится индуктивный подход – это построение теории, основанной на уже имеющихся данных. Зависимость успешной аутентификации от точности данных схематично представлено на рис. 3 [20].

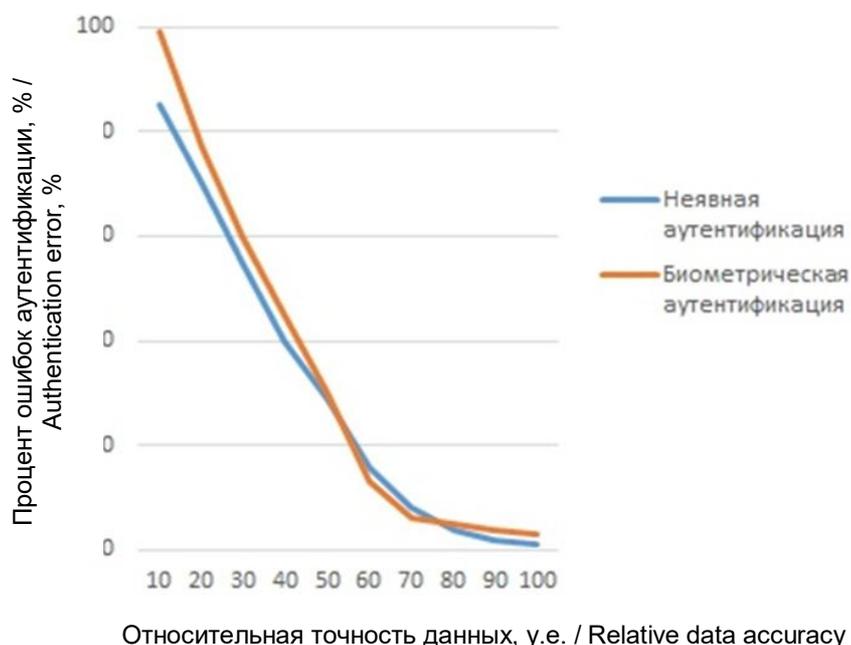


Рис. 3. Зависимость успешной аутентификации от предоставляемой точности данных

Fig. 3. Dependence of successful authentication on provided data accuracy

Также следуя из вышеизложенного, на рисунке схематично представлен график зависимости точности аутентификации от входной информации.

Из рис. 3 следует, что применение биометрических моделей требует высокой точности исходных данных. Предлагаемый метод при условии разбиения информационного потока на маленькие блоки более эффективен. При защите более ценной информации предлагаемый метод сравним с биометрической аутентификацией, однако предложенный метод аутентификации вполне достаточно использовать для защиты данных от злоумышленников в повседневной жизни.

Выводы

В данной статье предложена и оценена управляемая событиями схема неявной аутентификации для управления мобильным доступом. Схема предназначена для прозрачной и адаптивной работы путем вычисления совокупных баллов (указывающих на уровень доступа пользователя). Результаты показывают, что выполнимо и практически создать эффективную систему неявной аутентификации из легкодоступных повседневных телефонных данных, с помощью которых вычисляется пороговое значение, при котором неявная аутентификация считается успешно пройденной.

Список литературы

1. Intuitive security policy configuration in mobile devices using context profiling / A. Gupta, M. Miettinen, N. Asokan, M. Nagy // In Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT), 2012 International.
2. Data driven authentication: On the effectiveness of user behaviour modelling with mobile device sensors / H. G. Kayacik, M. Just, L. Baillie, D. Aspinall, N. Micallef // In Proceedings of the Third Workshop on Mobile Security Technologies (MoST), 2014.
3. "ePet: when cellular phone learns to recognize its owner / M. Tamviruzzaman, S. I. Ahamed, C. S. Hasan, C. O'brien // In Proceedings of the 2nd ACM workshop
4. Анализ потенциальных уязвимостей и современных методов защиты многопользовательских ресурсов / А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко, Е.Е. Конорева, М.О. Таныгин // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В. Г. Андронов. Курск, 2018. С. 136-140.
5. Организация системы сетевого мониторинга и оценки состояния информационной безопасности объекта / А.Л. Марухленко, К.Д. Селезнёв, М.О. Таныгин, Л.О. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 1. С. 118-129. <http://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-118-129>.
6. Progressive Authentication: Deciding When to Authenticate on Mobile Phones / O. Riva, C. Qin, K. Strauss, D. Lymberopoulos // In USENIX Security Symposium. 2012. P. 301-316.
7. Комплексная оценка информационной безопасности объекта с применением математической модели для расчета показателей риска / А.Л. Марухленко, А.В. Плугатарев, Л.О. Марухленко, М.А. Ефремов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 34-40.
8. Casa: context- aware scalable authentication / E. Hayashi, S. Das, S. Amini, J. Hong, I. Oakley // In Proceedings of the Ninth Symposium on Usable Privacy and Security. ACM, 2013. P. 3-13.
9. Марухленко А.Л., Мирзаханов П.С., Марухленко С.Л. Мониторинг и имитационное моделирование процессов взаимодействия абонентов вычислительной сети // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 236-241.
10. Установление доверительного канала обмена данными между источником и приёмником информации с помощью модифицированного метода одноразовых паро-

лей / М.О. Таныгин, Х.Я. Алшаиа, В.А. Алтухова, А.Л. Марухленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 4 (29). С. 63-71

11. Программный модуль для оценки криптостойкости симметричных методов шифрования с использованием параллельных вычислений / А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко, А.В. Плугатарев, В.П. Добрица // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В. Г. Андронов. Курск, 2018. С. 33-38.

12. Таныгин М.О., Берлизева В.А., Алшаиа Х.Я.А. Алгоритм обратимых преобразования для контроля аутентичности пакетов в сетях с низкой пропускной способностью // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам III Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В. Г. Андронов. Курск, 2019. С. 169-173.

13. Вариант организации защищенной системы контроля версий и обновления программного обеспечения для компиляции дистрибутивов / А.Л. Марухленко, Н.К. Зарубина, А.А. Шамина, И.И. Марухленко // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: материалы I Всероссийской научно-практической конференции: в 2 ч. / отв. ред. В. Г. Андронов. Курск, 2017. С. 190-196.

14. Blerton Abazi, Besnik Qehaja, Edmond Hajrizi. Application of biometric models of authentication in mobile equipment. IFAC-PapersOnLineVolume 52, Is. 252019. P. 543-546.

15. Марухленко А.Л., Мирзаханов П.С. Программный комплекс для моделирования процесса передачи и обработки сетевых потоков данных // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 175-180.

16. Ефремова Е.О., Калугин Е.В. Адаптивный алгоритм аутентификации источника сообщений // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: материалы V Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых. Тольятти, 2019. С. 38-42.

17. Пат. 2541131 Российская Федерация, МПК G06K9/62. Способ динамической биометрической аутентификации личности по особенностям почерка / Добрица В.П., Милых В.А., Лапина Т.И., Лапин Д.В.; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. № 2013128214/08; заявл. 19.06.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36.

18. Администрирование информационных систем / Д.О. Бобынцев, Л.А. Лисицин, А.Л. Марухленко, С.А. Кужелева; Юго-Зап. гос.ун-т. Курск, 2019. 201 с.

19. Безопасность информационных систем / А.Л. Марухленко., М.О. Таныгин, М.А. Ефремов, А.Г. Спешаков; Юго-Зап. гос.ун-т. Курск, 2019. 210 с.
20. Разработка защищенных корпоративных систем на базе клиент-серверной технологии / М.А. Ефремов, Ю.А. Халин, А.Л. Марухленко, Л.О. Марухленко; Юго-Зап. гос.ун-т. Курск, 2018. С. 176.

References

1. Gupta A., Miettinen M., Asokan N., Nagy M. Intuitive security policy configuration in mobile devices using context profiling. In Privacy, Security, Risk and Trust (PASSAT), 2012 International.
2. Kayacik H. G., Just M., Baillie L., Aspinall D., Micallef N. Data driven authentication: On the effectiveness of user behavior modeling with mobile device sensors. In Proceedings of the Third Workshop on Mobile Security Technologies (MoST), 2014.
3. Tamviruzzaman M., Ahamed S. I., Hasan C. S., O'brien C. ePet: when cellular phone learns to recognize its owner. In Proceedings of the 2nd ACM workshop.
4. Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O., Konoreva E.E., Tanygin M.O. [Analysis of potential vulnerabilities and modern methods of protecting multi-user resources]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific-practical conference]. Kursk, 2018, pp. 136-140 (In Russ.).
5. Marukhlenko A.L., Seleznev K.D., Tanygin M.O., Marukhlenko L.O. Organizatsiya sistemy setevogo monitoringa i otsenki sostoyaniya informatsionnoi bezopasnosti ob"ekta [Arrangement of the System of Network Monitoring and Assessment of the State of Information Security of an Object]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 118-129 (In Russ.) <http://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-118-129>.
6. Riva O., Qin C., Strauss K., Lymberopoulos D. Progressive Authentication: Deciding When to Authenticate on Mobile Phones. In USENIX Security Symposium, 2012, pp. 301-316.
7. Marukhlenko A.L., Plugatarev A.V., Marukhlenko L.O., Efremov M.A. Kompleksnaya otsenka informatsionnoi bezopasnosti ob"ekta s primeneniem matematicheskoi modeli dlya rascheta pokazatelei riska [A comprehensive assessment of the information security of an object using a mathematical model for calculating risk indicators]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika*,

informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 34-40 (In Russ.).

8. Hayashi E., Das S., Amini S., Hong J., Oakley I. Casa: context-aware scalable authentication." In Proceedings of the Ninth Symposium on Usable Privacy and Security, ACM, 2013, pp. 3-13.

9. Marukhlenko A.L., Mirzakhanov P.S., Marukhlenko S.L. Monitoring i imitatsionnoe modelirovanie protsessov vzaimodeistviya abonentov vychislitel'noi seti [Monitoring and simulation modeling of processes of interaction between subscribers of a computer network]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012. no. 2-3, pp. 236-241 (In Russ.).

10. Tanygin M.O., Alshaya Kh.Ya., Altukhova V.A., Marukhlenko A.L. Ustanovlenie doveritel'nogo kanala obmena dannymi mezhdu istochnikom i priemnikom informatsii s pomoshch'yu modifitsirovannogo metoda odnorazovykh parolei [Establishing a confidence channel for exchanging data between a source and a receiver of information using the modified one-time password method]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 63-71 (In Russ.).

11. Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O., Plugatarov A.V., Dobritsa V.P. [A software module for assessing the cryptographic strength of symmetric encryption methods using parallel computing]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya sbornik nauchnykh statei po materialam II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Infocommunications and space technologies: state, problems and solutions. The collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2018, pp. 33-38 (In Russ.).

12. Tanygin M.O., Berliseva V.A., Alshaya Kh.Ya.A. [Reversible conversion algorithm to control packet authenticity in networks with low bandwidth]. *INFOkommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya sbornik nauchnykh statei po materialam III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [INFO communications and space technologies: state, problems and solutions. The collection of scientific articles based on the materials of the III All-Russian scientific-practical conference]. Kursk, 2019, pp. 169-173 (In Russ.).

13. Marukhlenko A.L., Zarubina N.K., Shamina A.A., Marukhlenko I.I. [A variant of organizing a secure version control system and software updates for compiling distributions]. *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya. Materialy I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Infocommunications and space technologies: state, problems and ways of solving. Materials of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kursk, 2017, pp. 190-196 (In Russ.).

14. Blerton Abazi, Besnik Qehaja, Edmond Hajrizi. Application of biometric models of authentication in mobile equipment. *IFAC-PapersOnLine* Volume 52, is. 252019, pp. 543-546.

15. Marukhlenko A.L., Mirzakhanov P.S. Programmnyi kompleks dlya modelirovaniya protsessa peredachi i obrabotki setevykh potokov dannykh [A software package for modeling the process of transmitting and processing network data streams]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2012, no. 2-3, pp. 175-180 (In Russ.).

16. Efremova E.O., Kalugin E.V. [Adaptive message source authentication algorithm]. *Prikladnaya matematika i informatika: sovremennye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (shkoly-seminara) molodykh uchenykh*. [Applied mathematics and computer science: modern research in the field of natural and technical sciences. Materials of the V International scientific-practical conference (school-seminar) of young scientists]. Tolyatti, 2019, pp. 38-42 (In Russ.).

17. Dobritsa V.P., Milykh V.A., Lapina T.I., Lapin D.V. *Sposob dinamicheskoi biometricheskoi autentifikatsii lichnosti po osobennostyam pocherka* [The method of dynamic biometric authentication of personality according to the features of handwriting]. Patent RF, 2541131 C2, 02/10/2015. Application No. 2013128214/08 of 06/19/2013 (In Russ.).

18. Bobyntsev D.O., Lisitsin L.A., Marukhlenko A.L., Kuzheleva S.A. *Administrirovanie informatsionnykh sistem* [Administration of information systems]. Kursk, 2019, 201 p. (In Russ.).

19. Marukhlenko A.L., Tanygin M.O., Efremov M.A., Spevakov A.G. *Bezopasnost' informatsionnykh sistem* [Security of information systems]. Kursk, 2019, 210 p. (In Russ.).

20. Efremov M.A., Khalin Yu.A., Marukhlenko A.L., Marukhlenko L.O. *Razrabotka zashchishchennykh korporativnykh sistem na baze klient-servernoi tekhnologii* [Development of secure corporate systems based on client-server technology]. Kursk, 2018, 176 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Марухленко Анатолий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: proxy33@mail.ru

Anatoliy L. Marukhlenko, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: proxy33@mail.ru

Плугатарев Алексей Владимирович, магистрант кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aplugatarev@bk.ru

Aleksey V. Plugatarev, Master Student of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aplugatarev@bk.ru

Таныгин Максим Олегович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tanygin@yandex.ru

Maksim O. Tanygin, Cand. of Sci. (Engineering), Head of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tanygin@yandex.ru

Марухленко Леонид Олегович, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: leonid.marukhlenko@mail.ru

Leonid O. Marukhlenko, Senior Lecturer of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: leonid.marukhlenko@mail.ru

Шашков Максим Юрьевич, магистрант, кафедры информационной безопасности, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: dmax2019@yandex.ru

Maksim Yu. Shashkov, Master Student of Information Security Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: dmax2019@yandex.ru

Концептуальная структура системы управления клиентской базой страховой компании

А.С. Смирнова¹, А.А.Ханова¹ ✉

¹ ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», ул. Татищева 16, г. Астрахань 414056, Российская Федерация

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Разработка концептуальной структуры управления клиентской базой страховой компании на основе интеграции моделей интеллектуального анализа данных и системной динамики. Реализация концептуальной структуры предполагает кластеризацию клиентской базы, моделирование динамики клиентской базы и разработку стратегических целей для каждого сегмента клиентской базы с целью увеличения продолжительности жизненного цикла клиента.

Методы. Представлена теоретико-множественная модель деятельности страховой компании в разрезе управления взаимоотношениями с клиентами, что позволило определить логическую структуру, системные взаимосвязи, а также совокупность выполняемых в рамках этого процесса функций.

Результаты. Предложенная концептуальная структура системы управления взаимоотношениями с клиентами включает в себя инструменты анализа ключевых показателей клиентской базы, сегментации базы с помощью нескольких способов кластеризации и структурирование по признакам доходности, удовлетворенности клиентов страховыми услугами, а так же разработку стратегий развития продаж для каждого сегмента клиентов, включающую в себя формирование управленческих решений в виде маркетинговых мероприятий, что позволит оптимизировать расходы при продвижении услуг на рынке благодаря рациональному и грамотному позиционированию.

Заключение. На основании поставленной задачи предложен алгоритм, позволяющий анализировать клиентскую базу по ключевым показателям, сегментировать, структурировать клиентов и формировать для каждого кластера стратегии развития продаж страховой компании, направленные не только на удержание действующих клиентов, но и на повышение ценности каждого клиента за счет увеличения его жизненного цикла и роста объемов продаж, а так же на увеличение объемов страховых сборов за счет привлечения новых клиентов компании.

Ключевые слова: кластерный анализ; системная динамика; клиентская база; страхование; управленческие решения; стратегия; продажи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Смирнова А.С., Ханова А.А. Концептуальная структура системы управления клиентской базой страховой компании // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 122-135. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-122-135>.

Поступила в редакцию 25.02.2020

Подписана в печать 02.04.2020

Опубликована 20.04.2020

© Смирнова А.С., Ханова А.А., 2020

Conceptual Structure of the Insurance Company's Customer Database Management System

Anastasia S. Smirnova¹, Anna A. Khanova¹ ✉

¹ Astrakhan State Technical University
16 Tatishchev str., Astrakhan 414056, Russian Federation

✉ e-mail: akhanova@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a conceptual structure for managing the customer database of the insurance company based on the integration of models of data mining and system dynamics. The implementation of the conceptual structure involves clustering the customer database, modelling the dynamics of the customer database and developing strategic goals for each segment of the customer database in order to increase customer lifetime value

Methods. The article presents a theory-multiple model of the insurance company activity in the context of customer relationship management, which made it possible to determine the logical structure, system relationships as well as a set of functions performed within this process.

Results. The proposed conceptual structure of the customer relationship management system includes tools for analyzing key indicators of the customer database, segmenting the database using several clustering methods and structuring by indicators of customer's profitability, satisfaction with insurance services as well as strategizing sales development for each customer segment, which includes the formation of management decisions in the form of marketing activities, optimizing costs and expenses in promoting services on the market due to rational and competent positioning.

Conclusion. Based on the task set, an algorithm that allows analyzing the customer database by key indicators, segmenting, structuring customers and forming sales development strategies of the insurance company aimed not only at retaining existing customers but also at increasing the value of each one by increasing customer lifetime value and increasing sales for each cluster as well as increasing the volume of insurance premiums by attracting new customers is proposed.

Keywords: cluster analysis; system dynamics; customer database; insurance; managerial decision; strategy; sales.

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

For citation: Smirnova A. S., Khanova A. A. Conceptual Structure of the Insurance Company's Customer Database Management System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 122-135 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-122-135>.

Received 25.02.2020

Accepted 02.04.2020

Published 20.04.2020

Введение

В условиях кризиса российским страховым компаниям трудно выстроить стратегию дальнейшего развития. Сложная ситуация на страховом

рынке приводит к проседанию по всем направлениям. Российским страховым компаниям необходимо стараться удерживать клиентов, чтобы при стабилизации экономики незамедлительно пойти в рост. Необходимо на постоянной осно-

ве осуществлять мониторинг и исследовать клиентскую базу, анализировать ключевые показатели деятельности страховой компании в целях повышения эффективности страховой деятельности, сохранения и наращивания объемов страховых сборов, положительного финансового результата и выполнения плановых заданий.

Вопрос об управлении клиентской базой начали изучать ближе к концу 20 века зарубежные ученые в области маркетинга [1]. Можно выделить два основных направления управления клиентской базой: на основе показателя лояльности (представлено в трудах Ж.-Ж. Ламбена, Ф. Райчелда, А.В. Цысарь [2,3] и др.) и на основе долгосрочной стоимости клиента (представлен в работах П.Бергера и Н.Насра, Ф.Райчелда, П.Фадера и Б.Харди [4,5] и др.).

Однако описанные подходы рассматривают клиентскую базу в целом, не углубляясь в структуру базы, не позволяют использовать все управленческие ресурсы для достижения поставленных задач и развития продаж. **Цель работы** – повышение эффективности управления страховой компанией за счет разработки концептуальной структуры системы управления клиентской базой и формирования стратегий развития продаж на основе кластеризации и построения модели системной динамики клиентской базы.

Материалы и методы

Деятельность страховой компании в разрезе управления взаимоотношениями с клиентами может быть представ-

лена следующим кортежем теоретико-множественной модели [6,7]:

$$SK = \langle CDB, S, OP, R, W \rangle,$$

где CDB – клиентская база данных страховой компании; S – множество стратегий развития клиентской базы, $S = (s_1, s_2, \dots, s_{sn})$; OP – множество основных процессов страховой компании в разрезе управления взаимоотношениями с клиентами, $OP = (op_1, op_2, \dots, op_{opn})$; R – множество ресурсов страховой компании, участвующих в управлении взаимоотношениями с клиентами, $R = (r_1, r_2, \dots, r_m)$; W – множество экзогенных факторов, $W = (w_1, w_2, K, w_{wn})$. Рассмотрим параметры каждого множества более подробно.

Клиентскую базу СК можно представить в виде совокупности: $CDB = \langle C, Pr, I, P \rangle$.

В этой формуле переменные имеют следующий вид:

C – комплекс данных, который содержит информацию о клиентах СК, $C = \langle Co, Cs \rangle$. Целевая разработка клиентской базы СК предполагает разделение данных на множества общих сведений о лице (имя, адрес, контакты и пр.) $Co = (co_1, co_2, \dots, co_{con})$ и специальных данных $Cs = (cs_1, cs_2, \dots, cs_{csn})$, касающихся приобретенных продуктов СК, особенностей бизнеса клиентов (объект страхования, тариф, правила страхования, сумма начисленной оплаченной премии и убытков и пр.).

Pr – признак сегментации клиентской базы, $Pr = (pr_1, pr_2, \dots, pr_{pm})$. Кластеризация клиентской базы СК может проходить на основе маркетинговых исследований и социологических опросов [8], RFM-сегментации (Recency – давность, Frequency – частота, Monetary – сумма покупок), индекса лояльности и подсчета прибыли и пр.

I – механизм анализа клиентской базы и принятий стратегий S является кортежем следующего вида:

$$I = \langle M, Vz, Ms \rangle,$$

где M – модуль кластеризации и сегментации клиентской базы; Vz – модуль системной динамики; Ms – модуль формирования стратегии и принятия управленческих решений.

P – множество показателей управления клиентской базой СК, $P = \langle P_k, P_s, P_d, P_u \rangle$, где P_k – количество договоров на 1 страхователя (кросс-продажи); P_s – «средний» чек на 1 покупателя; P_d – длительность сотрудничества; P_u – удовлетворенность клиента.

Сегментация клиентской базы играет важную роль для решения задачи эффективного управления группами клиентов. Кластеризация позволяет детально рассмотреть структуру клиентской базы, а также проанализировать влияние показателей управления $P = \langle P_k, P_s, P_d, P_u \rangle$ на долю каждого сегмента (группы клиентов) в клиентской базе. Кроме того, специальный визуализатор карты Кохонена позволяет наглядно увидеть результат сегмента-

ции клиентской базы, с помощью раскраски карты выделяются группы клиентов с похожими признаками.

Исходя из полученных данных формируется стратегия развития клиентской базы страховой компании, включающая в себя множество стратегических целей $S = (s_1, s_2, \dots, s_{sn})$, и утверждается сроком на год руководством СК (Председатель Правления, директора профильных дирекций) в виде служебной записки, которая в начале года направляется во все структурные подразделения на исполнение. Процесс формирования стратегических целей отвечает следующему условию:

$$f(S_1^0, S_2^0, \dots, S_{(ns_n)}^0) = 0;$$

$$f(S_1^1, S_2^1, \dots, S_{(ns_n)}^1) = 1; 0 \leq f \leq 1,$$

где S_i^1 – целевые значения показателей управления клиентской базой СК; f – уровень достижения стратегической цели развития клиентской базы СК. В табл. 1 представлены примеры стратегических целей страховой компании.

Основные процессы страховой компании в разрезе управления взаимоотношениями с клиентами можно описать следующим кортежем:

$$OP = \langle Y, D, Pr, A, Sup, L \rangle,$$

где Y – множество маркетинговых мероприятий, которые являются основным бизнес-процессом в разрезе управления клиентской базой и представляют из себя по сути управленческие решения, включающие идентификацию потенциальных клиентов (страхователей), ис-

следование их потребностей в страховой защите, разработку требований к страховым услугам и условиям их продажи и др., $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{yn})$; D – множество процессов разработки страховых услуг и правил страхования (простые и комплексные, индивидуальные условия страхования, тарификация риска), $D = (d_1, d_2, \dots, d_{dn})$; Pr – множество продаж страховых услуг по основным каналам продаж, $Pr = (pr_1, pr_2, \dots, pr_{prn})$; A – множество процессов андеррайтинга, включающих оценку предлагаемых на страхование рисков, принятие решения о

страховании того или иного риска, определение адекватного страхового тарифа и условий страхования, формирование прибыльного страхового портфеля [10], $A = (a_1, a_2, \dots, a_{an})$; Sup – множество процессов сопровождения и обслуживания договоров страхования, $Sup = (sup_1, sup_2, \dots, sup_{supn})$; L – множество процессов урегулирования убытков, включающие в себя комплекс мероприятий, проводимых страховщиком в целях выполнения обязательств перед страхователем при наступлении страхового случая, $L = (l_1, l_2, \dots, l_{ln})$.

Таблица 1. Примеры стратегических целей развития клиентской базы страховой компании

Table 1. Examples of strategic goals for developing a client base of an insurance company

Стратегическая цель	Сущность стратегической цели	Формализация стратегической цели
Повышение прибыльности	Максимизация показателя чистого дисконтированного дохода NPV_{lc} страховой компании, по l -й операции, c -го управляемого субъекта	$\sum_l^{nl} \sum_c^{nc} NPV_{lc} \longrightarrow \max$
Качество обслуживания	Улучшение качества обслуживания Q_{ir} , i -ой операции, r -го управляемого субъекта в страховой компании	$\sum_i^{ni} \sum_r^{nr} Q_{ir} \longrightarrow \max$
Продвижение бренда	Максимизация стратегической конкурентоспособности бренда Br_{kp} страховой компании, по k -ой операции, p -го управляемого субъекта	$\sum_k^{nk} \sum_p^{np} Br_{kp} \longrightarrow \max$
Экономичность	Улучшение экономичности Ec_{uw} страховой компании, по u -й операции, w -го управляемого субъекта	$\sum_u^{nu} \sum_w^{nw} Ec_{uw} \longrightarrow \max$
Снижение рисков [9]	Минимизация рисков Rs_{md} страховой компании, по m -ой операции, d -го управляемого субъекта	$\sum_m^{nm} \sum_d^{nd} Rs_{md} \longrightarrow \max$

Множество маркетинговых мероприятий (ММ) представлено в виде совокупности:

$$Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\},$$

где y_1 – ММ с предоставлением скидки на определенные виды страхования; y_2 – ММ, в которых в качестве поощрения клиентов выступают специальные призы и подарки; y_3 – ММ со специальными условиями и предложениями по страхованию (например, комплексная программа страхования по нескольким видам); y_4 – маркетинговые мероприятия, связанные с проведением презентации страховых продуктов в целях привлечения покупателей; y_5 – маркетинговые мероприятия, предполагающие гарантированный возврат денег за приобретенные услуги; y_6 – маркетинговые мероприятия, позволяющие покупателю приобрести страховые услуги в кредит [11,12].

Множество ресурсов страховой компании, участвующих в управлении клиентской базой, можно представить в виде следующей совокупности:

$$R = \langle R_f, R_w, R_t, R_{teh} \rangle,$$

где R_f – финансовые ресурсы (необходимое количество денежных средств для бизнес-процессов в части управления взаимоотношениями с клиентами); R_w – трудовые ресурсы; R_t – временные ресурсы; R_{teh} – потребность технического обеспечения для осуществления функционирования процесса управления клиентской базой.

На деятельность страховой компании большое влияние оказывают экзогенные источники воздействия $W = (w_1, w_2, K, w_{mn})$. К ним относятся объединения страховщиков, надзорные и другие государственные органы, аналитические и рейтинговые агентства и клиенты страховой компании.

Формализованное описание процесса управления клиентской базой страховой компании на основе интегрированного анализа структуры и функций в виде теоретико-множественной модели позволило выявить совокупность выполняемых процессов, их системные взаимосвязи и логическую структуру.

Результаты и их обсуждение

Выбор стратегических ориентиров позволит страховой компании не только удержать действующих клиентов, но и обеспечить непрерывное развитие продаж и наращивание своего потенциала. Формирование стратегии развития – сложная и трудоемкая задача, от качества и способа ее реализации зависит вся дальнейшая деятельность страховой компании. Рассмотрим более подробно процесс формирования стратегий развития клиентской базы страховой компании, который включает в себя 4 основных этапа (рис. 1).

На первом этапе (этап 1, рис.1) происходит сбор, структурирование и консолидация данных в виде базы данных клиентов страховой компании, а так же расчет показателей $P = \langle P_k, P_s, P_d, P_u \rangle$

(кросс-продажи, «средний» чек на 1 покупателя, длительность сотрудничества, удовлетворенность клиентов) для дальнейшего анализа данных.

На сегодня в страховых компаниях используют несколько специализированных корпоративных информационных систем, которые выполняют определенные функции (например, «1С: управлением страховой компанией» предназначено для ведения договоров по клиентам, сохранения документов по клиентам и основной информации, «БОСС-кадровик» предназначен для управления персоналом компании, а также для расчета заработной платы, «CRM-системы» предназначены для автоматизации процессов взаимодействия компании и клиентов).

Но информационное обеспечение страховой компании не применяют непосредственно для анализа данных. Информацию, которая содержится в них, необходимо структурировать и консолидировать, а так же исключить возможные дубли, аномалии, ошибки. Для этих целей необходимо применять аналитическую платформу, которая позволит объединить данные из различных информационных систем в единое хранилище данных, т. к. данные платформы обладают всем необходимым инструментом извлечения, преобразования и обработки сырых данных. Одним из известных решений на рынке аналитических платформ средств является «Deductor».

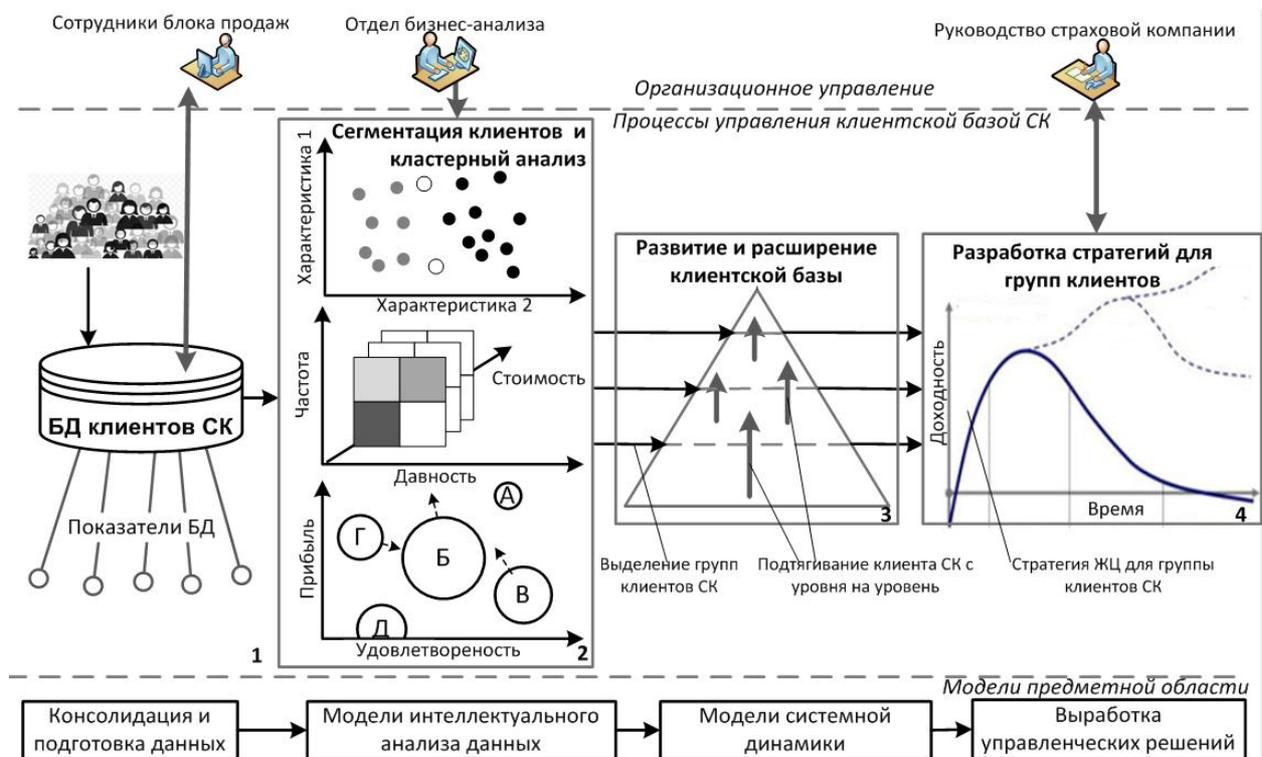


Рис. 1. Концептуальная структура системы управления клиентской базой страховой компании

Fig. 1. Conceptual structure of the insurance company's customer management system

На втором этапе (этап 2, рис. 1) осуществляется сегментация клиентской базы одним из нескольких методов, например:

1. Сегментация, основанная на маркетинговых исследованиях и социологических опросах, которая позволяет выделить кластеры клиентов по признаку удовлетворенности услугами страховой компании.

2. RFM-сегментация, которая позволяет разбивать на кластеры клиентскую базу исходя из показателей давности (Recency), частоты (Frequency) и суммы покупок (Monetary).

Сегментация, основанная на замерах NPS (индекс лояльности) [13] и подсчете прибыли

В результате сегментации формируются группы клиентов, например, в результате RFM-сегментации формируются группы: новые клиенты (покупали недавно, но редко); лояльные (покупали недавно и часто); отток из лояльных (покупали часто, но давно); отток (покупали давно и редко) [14]. Сегментация позволяет сопоставить маркетинговые мероприятия $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{yn})$ в соответствие каждой группе клиентов. Сегментация основанная на замерах NPS позволяет выделить следующие сегменты и обозначить соответствующие управленческие решения [15] в виде маркетинговых мероприятий по совершенствованию клиентской базы страховой компании: А – довольные клиенты (приносят много прибыли, их

необходимо изучать, чтобы понять причину, необходимо направить маркетинговые мероприятия на поиск клиентов такого же плана); Б – лояльные клиенты (почти не приносят прибыль, возможно пользуются излишними бонусами или слишком большими скидками, для таких клиентов необходима стратегия максимизации прибыли при минимизации потерь в лояльности); В – самый большой сегмент (основа бизнеса, необходимы маркетинговые мероприятия, которые помогут повысить прибыль без значимых потерь в лояльности); Д – ценные клиенты, которые оказались неудовлетворенными, требуются дополнительные инвестиции для исправления ситуации; Г – не приносят прибыли и не разносят хорошей молвы о страховой компании (важно понять, что объединяет этих клиентов, чтобы не тратить средства на привлечение таких же аудиторий в будущем) [16].

Сегментация клиентской базы страховой компании на основе карт Кохонена проведена в аналитической платформе Deductor и состоит из 2 этапов: построение сети Кохонена и визуализация в виде карты Кохонена. На первом этапе с помощью нейронной сети исходные данные (входящие вектора) в процессе обучения разбиваются на классы по схожим признакам. На втором этапе результаты кластеризации визуализируются с помощью инструмента карты Кохонена, который представляет собой одномерную или двумерную структуру (рис. 2) [17].

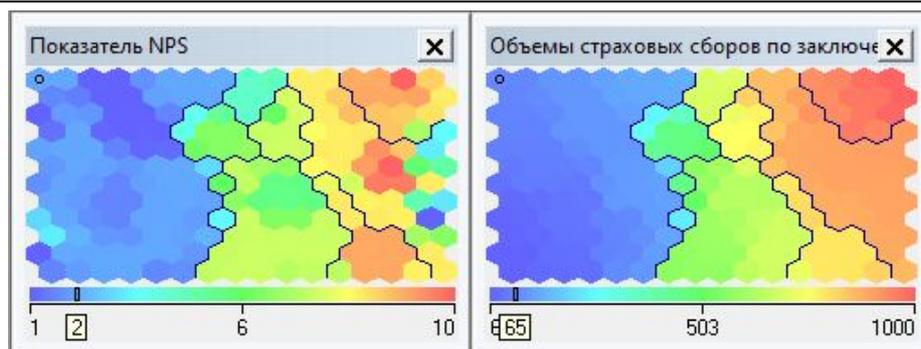


Рис. 2. Результат сегментации клиентской базы страховой компании

Fig. 2. Result of segmentation of the insurance company's customer base

Карта Кохонена является частным случаем сети Кохонена, она позволяет визуализировать полученные результаты сегментации. Кроме того, в нейронной сети количество выходных нейронов равно количеству кластеров, которое получается в результате сегментации, а в карте — количеству сегментов, из которого будет состоять карта, т.е. размеру карты, который может быть задан вручную. Чем больше количество сегментов карты, тем детальнее показано распределение признаков объекта выборки (ключевые показатели клиентской базы страховой компании).

Кластеры с идентичной расцветкой, образующие обособленные области, отображают группы клиентов с похожими значениями по показателям *NPS* и по объемам страховых сборов. На рис.2 показаны группы клиентов, которые наиболее часто пользуются услугами исследуемой страховой компании, а так же выделены клиенты, которые не удовлетворены качеством обслуживания и уровнем предоставляемых услуг. Полученные результаты необходимы для разработки стратегий по улучшению

клиентского сервиса и наращиванию объемов продаж.

На третьем этапе (этап 3, рис.1) для выделенных групп клиентов можно определить, какие клиенты являются стратегически ценными и обеспечивают долгосрочную доходность. Главная задача страховой компании – увеличить количество ценных клиентов, создать условия для перехода (подтягивания) клиентов из нижнего уровня пирамиды «Развития и расширения возможностей клиентской базы» в верхний, а так же нарастить объемы ценных клиентов путем привлечения новых. Для моделирования таких ситуаций предлагается использовать имитационные модели [18,19] системной динамики (СД). В модели СД отражаются глобальные изменения в структуре потоков, динамика клиентской базы страховой компании. Клиенты, продукты, события и другие дискретные элементы в моделях системной динамики представлены не как отдельные элементы, а как потоки [20]. Для формализации была построена модель системной динамики с использованием пакета имитационного модели-

рования Anylogic (рис. 3). Эксперименты с имитационной моделью системной динамики клиентской базы страховой компании показали увеличение действующих клиентов на 12,3%.

На четвертом этапе (этап 4, рис.1) автоматизирован процесс анализа жизненного цикла клиента, на основании которого можно получить подробную статистику по поведению клиента при влиянии на него тех или иных факторов.

Например, один покупатель, приобретя страховой продукт, по истечению срока страхования возвращается, чтобы пролонгировать договор или заключить новый по другому виду страхования, совершив таким способом кросс-продажу и увеличив объем страховых сборов компании, в то же время другой клиент после совершения первой покупки может отказаться от услуг данной страховой компании и уйти к конкурентам.

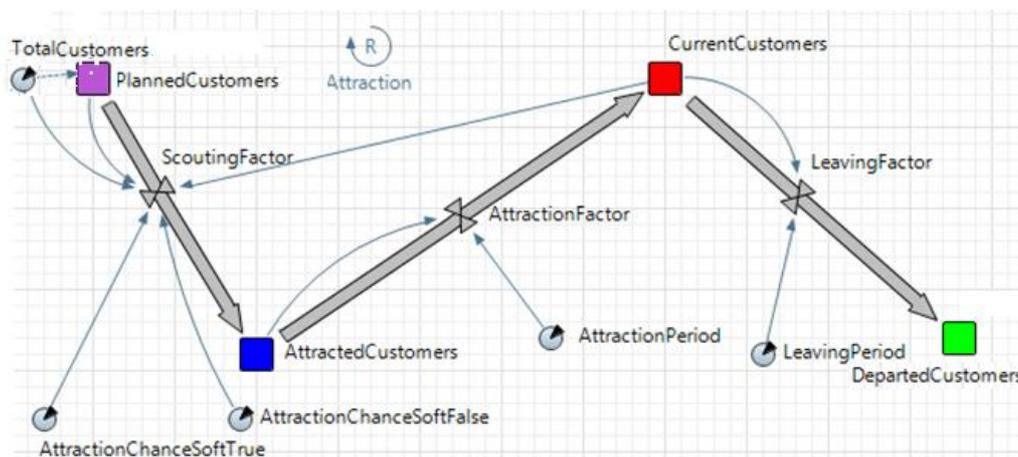


Рис. 3. Модель системной динамики клиентской базы страховой компании

Fig. 3. System dynamics model of the client base of an insurance company

Если увеличить выборку, проанализировав поведение всех покупателей, то можно выделить несколько групп клиентов с похожими признаками, увидеть, какие клиенты страховой компании нуждаются в дополнительной мотивации в виде маркетинговых акций, а на каких клиентов не целесообразно в данный момент тратить бюджет компании, т.к. уровень их лояльности достаточно высок.

Происходит формирование стратегий для каждой группы клиентов, которые включают в себя управленческие

решения (в виде ММ), направленные на развитие продаж в конкретном кластере. Это позволяет детально проработать каждый сегмент, провести направленную маркетинговую акцию, сформировать и предложить клиентам наиболее выгодные условия страхования, различные коробочные продукты, ввести скидки на определенные виды страхования, предоставлять дополнительные условия при пролонгации договора, вручать подарки за приобретенный полис. Но при этом уменьшить расходы и издержки при продвижении услуг. Это

приведет к увеличению продолжительности жизненного цикла клиента и увеличению объемов страховых сборов в долгосрочной перспективе, повышению коэффициента удержания клиентов до 80%. Чистый дисконтированный доход $\sum_{i=1}^n NPV_i$, где i - номер года, для разницы объемов начисленной премии имеет положительную величину и составляет +100,8 млн. руб. Выявлено, что клиентская база, сформированная с применением системы управления, по сравнению с клиентской базой без применения данного подхода экономически более выгодна для страховой компании.

Выводы

По результатам поставленной задачи была разработана концептуальная структура управления клиентской базой

на основе интеграции моделей интеллектуального анализа данных, системной динамики, управления жизненным циклом клиента страховой компании. Концептуальная структура включает в себя кластеризацию клиентской базы на основе ключевых показателей управления клиентской базой, ее структуризацию, выделение наиболее ценных клиентов для компании и процесс формирования отдельных стратегий развития для каждого сегмента клиентской базы или группы сегментов. Данный подход позволит не только удержать действующих клиентов, но и повысить ценность каждого клиента за счет увеличения его жизненного цикла и роста объемов продаж, а так же позволит нарастить объемы страховых сборов за счет привлечения новых клиентов компании.

Список литературы

1. Котлер Ф., Келлер К.Л. Маркетинг и менеджмент. 12-е изд. СПб.: Питер, 2007. 184 с.
2. Ламбен Ж.-Ж. Стратегический маркетинг. Европейская перспектива. СПб.: Наука, 1996. 590 с.
3. Цысарь А. В. Лояльность покупателей: основные определения, методы измерения, способы управления // Маркетинг и маркетинговые исследования. 2002. № 5 (41). С. 55-61.
4. Berger P. D., Nasr N. L. Customer Lifetime Value: Marketing Models and Applications // Journal of Interactive Marketing. Winter 1998. Vol. 12. Number I.
5. Fader P. S., Hardie B.G.S., Lee K. L. Counting Your Customers the Easy Way: An Alternative to the Pareto/NBD Model. Marketing Science, 2005. 24(2). P. 275–284.
6. Проталинский О.М., Ханова А.А., Григорьева И.О. Теоретико-множественная модель процессов грузового порта // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 83-89.

7. Голубкин И.А., Щербатов И.А. Теоретико-множественная модель процесса проведения инспекции газопроводов мобильным роботом // Инновационные информационные технологии. 2013. Т. 3. № 2. С. 85-88.

8. Цой М.Е., Щеколдин В.Ю. Современные методы исследований в маркетинге // Маркетинг. 2014. №2. С. 19-32.

9. The Australian and New Zealand Standard on risk management//Broadleaf Capital International [сайт]. Системные требования: Acrobat Reader. URL: http://www.broadleaf.com.au/pdfs/trng_tuts/tut.standard.pdf.

10. Фогельсон Ю.Б. Страхование право: теоретические основы и практика применения: монография. М.: Норма, ИНФРА-М, 2012. 574 с.

11. Зубец А.Н. Страховой маркетинг. М., 1998. 114 с.

12. Кучерова Н. В. Формирование системы маркетинговой деятельности страховых компаний на развивающихся рынках // Вестник Оренбургского государственного университета. 2010. № 4 (110). С. 81-86.

13. Герия И.А. Программы лояльности и оценка их эффективности // Управление и экономика в XXI веке. 2015. № 1. С. 47-52.

14. Титова Н.А., Щеколдин В.Ю. Разработка адресных маркетинговых стратегий на основе модифицированного RFM-анализа // Практический маркетинг. 2015. № 4. С. 8-16.

15. Разиньков П.И. Проблемы моделирования процесса разработки и принятия управленческих решений на предприятии // Вестник Тверского государственного технического университета. 2012. № 21. С. 119-123.

16. Тимофеева Е. М Особенности маркетинга страховых продуктов // Бизнес. Образование. Право. Вестник Волгоградского института бизнеса. 2013. № 3(24). С. 224-227.

17. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб.: Питер, 2010. 704 с.

18. Щербатов И.А. Математические модели сложных слабоформализуемых систем: компонентный подход // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 70-78.

19. Проталинский И.О., Щербатов И.А. Исследование эффективности группового управления роботами методами имитационного моделирования // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. Т. 4. № 2 (50). С. 34-37.

20. Имитационное моделирование бизнес-процессов / А. А. Ханова, И. О. Бондарева, Н. П. Ганюкова, О. О. Еременко. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2016. 280 p.

References

1. Kotler F., Keller K.L. Marketing i menedzhment [Marketing and management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2007, 184 p. (In Russ.).

2. Lamben J.-J. *Strategicheskii marketing. Evropeiskaya perspektiva* [Strategic marketing. European perspective]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1996, 590 p. (In Russ.).

3. Tsysar A. V. Loyal'nost' pokupatelei: osnovnye opredeleniya, metody izmereniya, sposoby upravleniya [Customer loyalty: basic definitions, measurement methods, control methods]. *Marketing i marketingovye issledovaniya = Marketing and Marketing Research*, 2002, no. 5 (41), pp. 55-61 (In Russ.).
4. Berger P. D., Nasr N. L. Customer Lifetime Value: Marketing Models and Applications. *Journal of Interactive Marketing*, winter 1998, vol. 12, no. 1.
5. Fader P. S., Hardie B.G.S., Lee K. L. Counting Your Customers the Easy Way: An Alternative to the Pareto/NBD Model. *Marketing Science*, 2005, no. 24(2), pp. 275–284.
6. Protalinsky O.M., Khanova A.A., Grigoryeva I.O. Teoretiko-mnozhestvennaya model' protsessov gruzovogo porta [Set-theoretic model of cargo port processes]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer engineering and computer science*, 2009, no. 2, pp. 83-89 (In Russ.).
7. Golubkin I.A., Scherbatov I.A. Teoretiko-mnozhestvennaya model' protsessa provedeniya inspektsii gazoprovodov mobil'nym robotom [A set-theoretic model of the process of gas pipeline inspection by a mobile robot]. *Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii = Innovative Information Technology*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 85-88 (In Russ.).
8. Tsoi M.E., Schekoldin V.Yu. Sovremennye metody issledovaniia v marketinge [Modern research methods in marketing]. *Marketing = Marketing*, 2014, no. 2, pp. 19-32 (In Russ.).
9. The Australian and New Zealand Standard on risk management//Broadleaf Capital International [site]. Available at: http://www.broadleaf.com.au/pdfs/trng_tuts/tut.standard.pdf.
10. Vogel'son Yu.B. *Strakhovoe pravo: teoreticheskie osnovy i praktika primeneniya* [Insurance law: theoretical foundations and application practice]. Moscow, Norma, INFRA-M Publ., 2012, 574 p. (In Russ.).
11. Zubets A.N. *Strakhovoi marketing* [Insurance Marketing]. Moscow, 1998. 114 p. (In Russ.).
12. Kucherova N. V. Formirovanie sistemy marketingovoi deyatel'nosti strakhovykh kompanii na razvivayushchikhsya rynkakh [Formation of a system of marketing activities of insurance companies in emerging markets]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Orenburg State University*, 2010, no. 4 (110), pp. P. 81-86 (In Russ.).
13. Geriya I.A. Programmy loyal'nosti i otsenka ikh effektivnosti [Loyalty programs and evaluation of their effectiveness]. *Upravlenie i ekonomika v XXI veke = Management and Economics in the XXI Century*, 2015, no. 1, pp. 47-52 (In Russ.).
14. Titova N.A., Schekoldin V.Yu. Razrabotka adresnykh marketingovykh strategii na osnove modifitsirovannogo RFM-analiza [Development of targeted marketing strategies based on modified RFM analysis]. *Prakticheskii marketing = Practical marketing*, 2015, no. 4, pp.8-16 (In Russ.).

15. Razinkov P.I. Problemy modelirovaniya protsessa razrabotki i prinyatiya upravlencheskikh reshenii na predpriyatii [Problems of modeling the process of development and adoption of managerial decisions at the enterprise]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tver State Technical University*, 2012, no. 21, pp. 119-123 (In Russ.).

16. Timofeeva E. M. Osobennosti marketinga strakhovykh produktov [Features of marketing of insurance products]. *Biznes. Obrazovanie. Pravo. Vestnik Volgogradskogo instituta biznesa = Business. Education. Right. Bulletin of the Volgograd Institute of Business*, 2013, no. 3 (24), pp. 224-227 (In Russ.).

17. Paklin N.B., Oreshkov V.I. *Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam* [Business analytics: from data to knowledge]. St. Petersburg, Peter Publ., 2010, 704 p. (In Russ.).

18. Scherbatov I.A. Matematicheskie modeli slozhnykh slaboformalizuemykh si-stem: komponentnyi podkhod [Mathematical models of complex weakly formalizable systems: component approach]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2014, no. 2 (22), pp. 70-78 (In Russ.).

19. Protalinsky I.O., Scherbatov I.A. Issledovanie effektivnosti gruppovogo upravleniya robotami metodami imitatsionnogo modelirovaniya [Study of the effectiveness of group control of robots by simulation methods]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Saratov State Technical University*, 2010, vol. 4, no. 2 (50), pp. 34-37 (In Russ.).

20. Khanova A. A., Bondareva I. O., Ganyukova N. P., Eremenko O. O. *Imitatsionnoe modelirovanie biznes-protsessov* [Simulation modeling of business processes]. Astrakhan, 2016, 280 p. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Смирнова Анастасия Сергеевна, аспирант кафедры «Прикладная информатика», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: anastasiia-smirnova@mail.ru

Anastasia S. Smirnova, Post-Graduate Student, Department of Applied Computer Science, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: anastasiia-smirnova@mail.ru

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Российская Федерация, e-mail: akhanova@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2693-8876>

Anna A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, e-mail: akhanova@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2693-8876>

Цифровые водяные знаки с адаптивной шириной информационного кольца в задаче скрытой передачи управляющего сигнала в многоагентной робототехнической системе

О.О. Шумская ¹ ✉, А.О. Исхакова ²

¹ Санкт-Петербургский Институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
14 линия В.О. 39, г. Санкт-Петербург 199178, Российская Федерация

² ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН»
ул. Профсоюзная 65, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: shumskaya.oo@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Статья посвящена вопросу обеспечения безопасной передачи управляющих сигналов между элементами многоагентной робототехнической системы. Целью работы является обеспечение скрытой передачи данных с возможностью однозначного извлечения управляющих сигналов.

Методы. Для решения поставленной задачи был предложен алгоритм на основе методов водяных цифровых знаков и цифровой стеганографии. Метод формирования цифрового водяного в форме кольца с симметрией позволяет не только обеспечить максимальную незаметность встраивания (незначительные искажения контейнера при сокрытии), но и уберечь передаваемый сигнал от таких сложных искажений, как поворот изображения. Метод стеганографического сокрытия позволяет регулировать интенсивность встраивания с помощью фактора силы, вычислительно прост и понятен. Предложенный подход к выявлению и пониманию передаваемого сигнала отличается от современных методов криптографии и стегоанализа тем, что не требует 100% верного извлечения сигнала. После нескольких модификаций метод позволяет минимизировать времязатраты на формирование (адаптивная ширина кольца с битами сигнала) и встраивание цифрового водяного знака (минимизация обрабатываемой области контейнера для встраивания).

Результаты. Предложенный подход позволяет скрыто передать управляющие сигналы в рамках передачи цифровых объектов, эксперименты показали, что управляющий сигнал однозначно понимается даже при таких искажениях, как уменьшение или увеличение контрастности или яркости, поворот изображения, сжатие.

Заключение. Использование предложенной методики передачи управляющих сигналов в многоагентной робототехнической системе позволит своевременно и безопасно, с минимальной вероятностью потери, получить необходимую информацию.

Ключевые слова: многоагентная робототехническая система; робототехнические комплексы; взаимодействие роботов; управление роботами; информационная безопасность; стеганографические методы защиты информации; цифровой водяной знак; верификация.

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

Финансирование. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00767.

Для цитирования: Шумская О.О., Исхакова А.О. Цифровые водяные знаки с адаптивной шириной информационного кольца в задаче скрытой передачи управляющего сигнала в многоагентной робототехнической системе // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020; 24(2): 136-152. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-136-152>.

Поступила в редакцию 30.01.2020

Подписана в печать 19.02.2020

Опубликована 20.04.2020

Digital Watermarks with Adaptive Information Ring Width in the Issue of Hidden Transmission of a Control Signal in the Multi-Target Robotic System

Olga O. Shumskaya ¹ ✉, Anastasia O. Iskhakova ²

¹ St.Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS)
39, 14-th Line V.O., St. Petersburg 199178, Russian Federation

² Institute of Control Science of RAS
65 Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: shumskaya.oo@gmail.com

Abstract

Purpose of research. The article is devoted to the issue of ensuring the safe transmission of control signals between the elements of a multi-agent robotic system. The purpose of the work is to provide hidden data transmission with the possibility of unambiguous extraction of control signals.

Methods. To solve the task set, an algorithm based on the methods of digital watermarks and digital steganography was proposed. The method of forming a digital watermark in the form of a ring with symmetry allows not only ensuring maximum imperceptibility of embedding (insignificant distortion of the container during concealment), but also to protect the transmitted signal from such complex distortions as image rotation. The steganographic concealment method allows regulating the intensity of embedding using the force factor; it is computationally simple and straightforward. The proposed approach to identifying and understanding the transmitted signal differs from modern methods of cryptography and steganalysis in that it does not require 100% correct signal extraction. After several modifications, the method allows minimizing the time spent on formation (adaptive width of the ring with signal bits) and embedding of a digital watermark (minimization of the processed area of the container for embedding).

Results. The proposed approach makes it possible to transmit control signals in a hidden way within the framework of the transmission of digital objects; the conducted experiments have shown that the control signal is unambiguously understood even with such distortions as a decrease or increase in contrast or brightness, image rotation, and compression.

Conclusion. Application of the proposed technique for transmitting control signals in a multi-agent robotic system will make it possible to receive the necessary information timely and safe, with a minimum probability of loss.

Keywords: multi-agent robotic system; robotic complexes; robot-robot interaction; robot control; IT security; steganographic methods.

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

Funding. The research was carried out with partial financial support of the RFBR in the framework of scientific project No. 19-01-00767.

For citation: Shumskaya O. O., Iskhakova A. O. Digital Watermarks with Adaptive Information Ring Width in the Issue of Hidden Transmission of a Control Signal in the Multi-Target Robotic System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 136-152 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-136-152>.

Received 30.01.2020

Accepted 19.02.2020

Published 20.04.2020

Введение

Актуальность разработки новых методов верификации агентов в мобильных робототехнических группах определена стремительным ростом распространения групповой робототехники в решении широкого спектра задач и в то же время отсутствием методического обеспечения для формирования безопасной среды обмена данными между агентами в таких группах. Актуальность разработки адаптированных алгоритмов маскирования управляющих сигналов связана со спецификой робототехнических комплексов, применяемых в силовых ведомствах (скрытие факта наличия роботов исполнителей, в условиях передачи потоков данных от роботов разведчиков) [1, 2].

В направлении робототехники сегодня актуальны задачи создания прорывных научно-технических решений, способных функционировать в условиях группового взаимодействия, создания сетевых систем управления, а также киберфизических систем комплексного назначения. Сетевое управление подразумевает взаимодействия в группе типа «оператор-робот» и «робот-робот» («агент-агент»), тем самым характеризуя новый этап развития удаленной коммуникации между объектами, отличающийся нали-

чием управляющих сигналов внутри группы и возможностью принятия решений агентами без участия оператора. Данная тенденция не только стала своего рода источником новых вызовов в области интеллектуализации систем управления, но и расширила спектр задач для разработчиков прикладных робототехнических комплексов, в том числе предназначенных для выполнения тактических задач. В этой связи прослеживается тенденция к популяризации комплексов групповой робототехники, увеличению числа роботов агентов в таких группах, и крайне важному аспекту – обеспечению их защищенного взаимодействия. Данная задача является комплексной и подразумевает решения целого множества научно-технических проблем, в том числе создания безопасных распределенных систем интеллектуального принятия решения на основе данных нескольких агентов, обеспечения целостности данных при взаимодействии (обмене данными) между агентами, а также конфиденциальности в условиях передачи информативных сигналов [3, 4].

Постановка задачи для системы защиты информации в многоагентных робототехнических комплексах, применяемых силовыми ведомствами, зачастую характеризуются необходимостью

учета таких условий, когда группа объектов (агентов) взаимодействует между собой вне зоны контролируемой территории. Данные обстоятельства накладывают ряд ограничений на открытую передачу данных и сигналов, поскольку в подобной обстановке вероятность несанкционированного доступа к данным и управлению агентами, а также связанные с этим риски, повышаются. В связи с изложенными особенностями возникает актуальная научная задача по модификации и адаптации применяемых для групп роботов методов защиты передаваемых данных и управляющих сигналов.

Материалы и методы

Текущее исследование предполагает решение фундаментальной проблемы создания эффективного обеспечения в области управления гетерогенными роботами и робототехническими комплексами, достижения необходимого уровня надежности и безопасности. Достижение данной цели предполагается за счет создания нового комплекса научно-технических решений для безопасного межмашинного обмена данными между агентами мобильных робототехнических групп с сетецентрическим управлением. Решение проблемы заключается в разработке концепции безопасного сетецентрического управления интеллектуальными роботами и коалициями роботов, создании соответствующих алгоритмов и протоколов безопасного взаимодействия, в частности реализа-

ции новых безопасных каналов передачи информации и интерфейсов взаимодействия с оператором / группой операторов / другими агентами [5, 6].

Рассмотрим группировку роботов в многоагентной системе в виде множества объектов C : $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, где c_i – робототехническое автономное или частично автономное устройство, выполняющее частную тактическую задачу; $i = 1, \dots, n$.

При этом каждое устройство c_i может быть охарактеризовано принадлежностью к одному из подмножеств множества C :

- принадлежность к подмножеству C^* наземной группы роботов, снабженных набором исполнительных устройств, предназначенных для выполнения общей цели, поставленной перед мобильной группировкой;

- принадлежность к подмножеству C'' – группы разведывательных роботов, в задачи которых входит выполнение обеспечивающих функций: разведка, координация и навигация множества роботов C^* .

Согласно описанной форме взаимодействия элементов группировки:

$$C = C^* \cup C''; C^* \cap C'' = \emptyset.$$

Также следует заметить, что радиус контролируемой территории определен некой территорией вокруг группировок – элементов описываемой среды. Также имеется комплекс контроля S , в задачи которого входят функции приема и передачи сигналов от элементов C_i друг к другу для обеспечения взаимодействия в рамках выполнения тактической задачи.

Распределение роботов C_i по большому пространству, возможность перераспределения задач между агентами, а также увеличенный набор выполняемых задач за счет установки индивидуальных исполнительных устройств являются преимуществами такого распределения объектов группировки. Агенты - элементы подмножества C'' обладают множеством демаскирующих признаков, которые делают их уязвимыми для охранных комплексов противника. При этом в общем представлении задачи предполагается, что ключи шифрования скомпрометированы, и противник может анализировать весь трафик, передаваемый между агентами разведки $c_i \in C''$. При этом, зачастую эффективным приемом таких проектов является наличие избыточности элементов в множестве C'' с целью усложнения анализа противником выполняемой тактической операции. Следует отметить, что при такой формулировке задачи важным представляется сокрытие фактов наличия роботов множества C^* и передачи им управляющих сигналов от элементов множества C'' и объекта S . Передача данных между элементами подмножеств C^* и C'' с сокрытием факта обмена данными предполагается с применением современных методов криптографии и стеганографии, как объективно эффективных и прогрессивных методов в решении подобных задач [7, 8]. В частности, предлагается рассмотреть методы образования и передачи цифровых водяных знаков в видеопотоках между элементами $c_i \in C$ [9].

В качестве стегоконтейнера в рассматриваемом подходе выступает видеопоток, формируемый робототехнической группировкой агентов-разведчиков, который представляет собой последовательность цифровых изображений с изображением местности. Стеганография подразумевает встраивание любой информации максимально незаметно не только для человеческого глаза, но и для аналитических программ противников. Одним из важнейших факторов, обеспечивающих незаметное встраивание ЦВЗ, устойчивость к искажениям при формировании, хранении или передаче стегоконтейнера, является выбор области встраивания как самого ЦВЗ в исходный объект, так и информации в формируемый ЦВЗ. Современные подходы стеганографии уже давно ушли от идей встраивания какой-либо информации в пространственную область (значения пикселей), ученые отдают предпочтение частотной области, в частности все больше исследований касаются встраивания в коэффициенты дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Такой выбор обоснован тем, что ДПФ позволяет вне зависимости от алгоритма встраивания достичь устойчивости от ряда атак [10, 11].

Общая схема таких алгоритмов сводится к нескольким основным шагам: формирование ЦВЗ на основе некоторого передаваемого сообщения согласно определенному правилу; встраивание ЦВЗ в Фурье-образ; проверка наличия конкретного ЦВЗ в стегоконтейнере. Можно выделить еще одну

общую особенность всех подходов – параметр встраивания, характеризующий силу встраивания, иными словами, насколько значения ЦВЗ внесут искажения в коэффициенты ДПФ исходного изображения. Важно отметить, что порой даже незначительное искажение некоторых коэффициентов ДПФ может привести к явным артефактам или неестественным явлениям на цифровом объекте, поэтому значение такого параметра должно быть подобрано таким образом, чтобы ЦВЗ можно было бы обнаружить по необходимости, но при этом оставить его незаметным для злоумышленников.

Авторы [12] предлагают для встраивания использовать дайджест сообщения, полученный с помощью хэш-функции. Полученное таким образом сообщение путём операции XOR между парами приводят к размеру 80 битов, которые и будут являться ЦВЗ.

Пространство сокрытия формируется из среднечастотных элементов первого и второго квадрантов Фурье-образа, значения которых на комплексной плоскости расположены в пределах кольцевой области заданной ширины. В данном случае фактор силы ЦВЗ не является параметром, он рассчитывается. Также рассчитываются разности между амплитудами симметрично расположенных элементов Фурье-образа. Встраивание осуществляется путём изменения амплитудных значений этих элементов.

Для обнаружения ЦВЗ рассчитывают долю верно извлечённых битов и сравнивают с пороговым значением. Если расчётное значение больше порога, то признаётся наличие ЦВЗ в изображении.

В работе [13] ЦВЗ формируется на основе псевдослучайно сгенерированного ключа. К полученному ЦВЗ применяют обратное логарифмическое полярное отображение, благодаря чему ЦВЗ приобретает свойство круговой симметрии. Это обеспечивает устойчивость перед геометрической атакой типа «поворот изображения». Процесс встраивания основан на пересчёте таких элементов амплитудного Фурье-спектра стегоконтейнера, которым соответствуют элементы цифрового водяного знака со значениями 1, путем усреднения по окрестности 3×3 с умножением на коэффициент усиления.

Для обнаружения факта встраивания искомого водяного знака авторы делят изображение на непересекающиеся окна размером 10×14 пикселей и ищут их локальные максимумы. Преобразуя локальные максимумы с помощью логарифмического полярного отображения, авторы определяют корреляцию между полученными значениями и значениями водяного знака. Решение о наличии ЦВЗ основывается на величине предопределённого порогового значения.

Автор работы [14] предполагает наличие ключа. Цифровое изображение делится на блоки 16×16 пикселей.

Встраивание осуществляется в средне-частотные элементы Фурье-образа, распределение битов ЦВЗ по которым осуществляется полуслучайным путем на основе ключа. Для извлечения ЦВЗ так же требуется знание ключа.

Авторы работы [15] предлагают циркулярное симметричное расположение битов сообщения в водяном знаке. ЦВЗ представляет собой амплитудный Фурье-спектр, элементы которого принимают значения из множества $\{-1, 1\}$. Элементы Фурье-образа образуют кольцо в области средних частот. Для устойчивости перед геометрической атакой типа «поворот изображения» ЦВЗ обладает симметрией: элементы зеркально отражены по диагонали. Авторами были рассмотрены два варианта встраивания: аддитивное и мультипликативное.

Для обнаружения наличия цифрового водяного знака в контейнере авторы предлагают рассчитывать корреляцию между значениями пикселей контейнера и предполагаемого ЦВЗ. Если величина корреляции превышает заранее предопределенный порог, то принимается решение о наличии проверяемого ЦВЗ в цифровом объекте.

Похожий алгоритм, но с меньшей емкостью водяного знака предложен авторами [16]. Емкость встраиваемого сообщения значительно сокращается из-за выбранной области в ЦВЗ. Авторы формируют ЦВЗ в виде окружности с оптимальным радиусом внедрения, а не кольца, и все элементы принимают значения из множества $\{0, 1\}$. В данном

алгоритме встраивание в коэффициенты дискретного преобразования Фурье осуществляется аддитивно. Для того чтобы выявить наличие известного ЦВЗ в изображении, авторы используют алгоритм, обратный встраиванию, основанный на оценке корреляции между извлеченными значениями и значениями данного ЦВЗ. При увеличении значения корреляции более предопределенного порога принимается решение о наличии сокрытого ЦВЗ.

В алгоритме, предложенном авторами работы [17], пространство сокрытия формируется так же из среднечастотных элементов, однако только первого и второго квадрантов (верхняя половина) Фурье - образа, значения которых на комплексной плоскости расположены в пределах кольцевой области заданной ширины. Для встраивания одного бита секретного сообщения в зависимости от его значения изменяется пара симметрично расположенных элементов в первом и втором квадрантах так, чтобы разность между ними приняла соответствующее значение. При встраивании и обнаружении ЦВЗ алгоритм предполагает 2 секретных ключа: размеры стандартного изображения, к которым масштабируют исходное изображение, и величины радиусов, ограничивающих рассматриваемую кольцевую область.

Процесс выявления наличия предполагаемого ЦВЗ в изображении заключается в вычислении разности симметрично расположенных элементов в первом и втором квадрантах соответственно в пределах кольцевой области

заданной ширины. Если разность больше или равна 0, то значение бита ЦВЗ принимается равным 1, иначе 0. На основе процента верно определенных битов между предполагаемым ЦВЗ и только что извлеченным принимается решение: если выявлено соответствие более 75%, то считается, что данный ЦВЗ скрыт в изображении.

В работах [18, 19] по изображению–контейнеру перемещается окно размером 2×2 . Встраивание является LSB-подобным, для записи битов сообщения используются младшие три бита частотных коэффициентов. В каждый блок встраивается 9 бит, во все элементы по 3 бита кроме DC-коэффициента.

Результаты и их обсуждение

Ниже приведен предлагаемый подход в виде алгоритмов преобразования сигнала в ЦВЗ, внедрения ЦВЗ и проверки наличия ЦВЗ.

Преобразование сигнала в ЦВЗ

Вход: Передаваемое сообщение, радиус R_{max} и граница R_{min} , определяющие ширину кольца встраивания; размеры ЦВЗ $N \times N$.

Выход: Сформированный ЦВЗ.

1. Преобразование сигнала в битовую последовательность.
2. Подбор значения R_{min} на основе длины битовой последовательности, но не менее его границы.

3. Расчет значений ЦВЗ согласно формуле

$$W(x, y) = \begin{cases} 0, R_{max} < r < R_{min} \\ \pm 1, R_{min} < r < R_{max} \end{cases}, \quad (1)$$

где R_{min} и R_{max} – границы кольцевой области, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Ранее в алгоритм формирования ЦВЗ было добавлено условие на случай, если длина сообщения меньше емкости кольцевого пространства ЦВЗ. В таком случае генерировались случайные значения из множества $\{-1, 1\}$, что сводило к минимуму возможность создания второго подобного ЦВЗ, однако могло содержать большое количество лишней информации и увеличивать объем ЦВЗ.

Сейчас предлагается формировать кольцо адаптивной ширины на основе длины передаваемого сообщения. Это сокращает время формирования ЦВЗ, сам знак содержит больше полезной информации, что позволяет повысить устойчивость перед атаками, искажающими контейнер за счет того, что область полезной информации сокращена и более сконцентрирована. Однако, чтобы область концентрации информации находилась в средних частотах, значение R_{max} зафиксировано и равно 41, а R_{min} ограничено и не может быть менее 13. Кольцо с граничными значениями ширины позволяет вместить порядка 150 символов.

Формируемый ЦВЗ обладает свойством симметрии за счет зеркального отражения значений по диагонали.

Внедрение ЦВЗ

Вход: Цифровой водяной знак размером $N \times N$, цифровое изображение размером $M \times K$, фактор силы ЦВЗ a .

Выход: Стегоизображение размером $M \times K$.

Поскольку ДПФ и ОДПФ, применяемые к цифровому объекту для перехода в частотную область, увеличивают время затраты на вычисления с увеличением размерности самого объекта, а в задаче информирования роботов-исполнителей в сетцентрической системе каждая секунда на счету, то принято решение в процессе встраивания рассматривать центральный блок цифрового объекта размерами $2N \times 2N$. Поскольку блок встраивания больше ЦВЗ, то границы внесенных искажений будут достаточно размыты и незаметны, а скорость обработки стегоконтейнера увеличится в разы. Помимо повышения скорости встраивания это позволит повысить устойчивость к различным искажениям стегоизображения, так как доля информативного блока в общем изображении относительно мала и менее уязвима.

При встраивании новые амплитудные значения стегоконтейнера рассчитываются по формуле:

$$M'(x, y) = M(x, y) + aM(x, y)W(x, y), (2)$$

где $M(x, y)$ – исходное амплитудное значение коэффициента ДПФ с координатами x, y .

В ходе работы были опробованы аддитивный и мультипликативный подходы внедрения ЦВЗ, было решено остановиться на мультипликативном, поскольку он позволял вносить мень-

шее искажение в контейнер при достаточном уровне обнаружения ЦВЗ.

Проверка наличия ЦВЗ

Вход: Стегоизображение размером $M \times N$, ЦВЗ размером $M \times N$, фактор силы ЦВЗ a , пороговое значение t .

Выход: Строка, содержащая решение о наличии искомого ЦВЗ в исследуемом стегоизображении.

1. Считывание стегоизображения, переход к цветовой модели YCbCr, дискретное преобразование Фурье (матрица F').

2. Считывание ЦВЗ, переход к виду -1, 0, 1 (матрица W).

3. Для каждого элемента из проверяемой области:

3.1. Если $W(x, y) = 1$, то

3.1.1. прибавление к общей сумме Sum соответствующего элемента $F(x, y)$;

3.1.2. увеличение счетчика положительных элементов N_+ на единицу;

3.1.3. прибавление к сумме положительных элементов Sum_+ соответствующего элемента $F(x, y)$.

3.2. Иначе

3.2.1. прибавление к общей сумме Sum соответствующего элемента $F(x, y)$;

3.2.2. увеличение счетчика отрицательных элементов N_- на единицу;

3.2.3. прибавление к сумме отрицательных элементов Sum_- соответствующего элемента $F(x, y)$.

4. Вычисление корреляции по формуле:

$$C_n = \left(\frac{\sum_{M' \in M'_+} M'(x, y)}{N_+} - \frac{\sum_{M' \in M'_-} M'(x, y)}{N_-} \right) \frac{N_+ + N_-}{2 \sum_{M' \in M'_+} aM'(x, y)}, \quad (3)$$

где N_+ – количество элементов ЦВЗ, равных 1;

N_- – количество элементов ЦВЗ, равных -1.

5. В случае если $C_n > T$, то принимается решение о наличии проверяемого ЦВЗ в стегоконтейнере, иначе – стегоконтейнер не содержит проверяемый ЦВЗ.

Для проверки эффективности предложенного подхода были проведены вычислительные эксперименты. В качестве контейнеров для проведения экспериментов были взяты фотографии неравномерной местности с различными препятствиями. Размер контейнеров 256×256 пикселей, сформированных ЦВЗ – 128×128 . Вложение ЦВЗ в контейнер осуществляется в центральную часть контейнера таким образом, чтобы центр ЦВЗ совпадал с центром контейнера, если их размеры не совпадают. Симметричность формируемого ЦВЗ позволяет достигать устойчивости скрытых данных перед некоторыми атаками, поэтому, конечно, желательно, чтобы положение ЦВЗ оставалось

неизменным, например, при поворотах контейнера на кратные 90° углы.

Пороговое значение C_n для всех тестов составляет 0,17. Радиус $R_2 = 41$, R_1 не менее 13, Фактор силы ЦВЗ $a = 0,3$.

Ниже представлены ЦВЗ, сформированные на основе секретных строк длиной 48 знаков (рис. 1.a), 77 знаков (рис. 1.b) и 150 знаков (рис. 1.c). При варьировании параметров емкость ЦВЗ достигает 2 300 знаков, однако в таком случае кольцо занимает практически весь ЦВЗ.

Далее в таблицах приведены результаты экспериментов: исходный контейнер, встраиваемый ЦВЗ, стегоконтейнер после встраивания, применяемая атака, результаты проверки наличия искомого ЦВЗ в контейнере. Приведенные в табл.2 и табл.3 результаты вычислительных экспериментов с применением искажений передаваемых стегоизображений, содержащих скрытый управляющий сигнал, показали, что даже довольно существенное изменение яркости и/или контрастности объекта не препятствует корректному распознаванию сигнала.

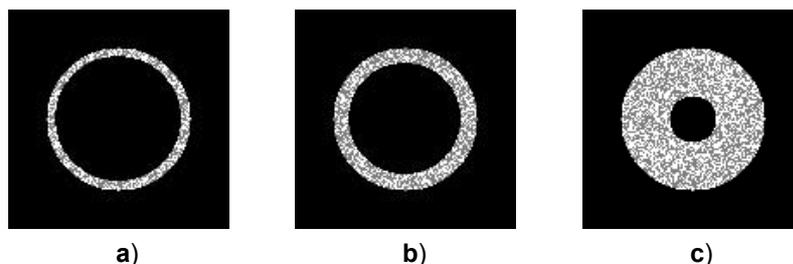


Рис. 1. Сформированные ЦВЗ

Fig. 1. Formed DWTs

Таблица 1. Вычислительные эксперименты без реализации атак**Table 1.** Computational experiments without attacks

Исходное изображение			
Встроенный ЦВЗ	без вложения	с	
Стегоизображение			
Атака	без атаки	без атаки	
Проверяемый ЦВЗ	а	с	а
C_n	0,0378	0,6771	0,0013
Проверяемый ЦВЗ найден?	Нет	Да	Нет

Таблица 2. Вычислительные эксперименты с искажением стегоизображения**Table 2.** Computational experiments with stego-image deformation

Исходные данные	Исходное изображение	Встроенный ЦВЗ				Стегоизображение			
		b							
Атака	JPEG-сжатие	Изменение яркости, %				Изменение контрастности, %			
		-40	-20	+20	+40	-40	-20	+20	+40
Проверяемый ЦВЗ	b								
C_n	0,2570	0,2187	0,3513	0,4435	0,3965	0,3871	0,4119	0,4497	0,4290
Проверяемый ЦВЗ найден?	Да								

Таблица 3. Вычислительные эксперименты с атакой «поворот изображения»**Table 3.** Computational experiments with image rotation attack

	Исходное изображение	Встроенный ЦВЗ	Стегоизображение
Исходные данные		с	
Атака	Поворот на 9°	Поворот на 60°	Поворот на 180°
Проверяемый ЦВЗ	с		
C_n	0,3020	0,0833	0,6771
Проверяемый ЦВЗ найден?	Да	Нет	Да

А величины корреляций, превышающие пороговое значение с запасом, позволяют сделать вывод, что метод устойчив и к более значительным искажениям.

В то же время реализация атак «Поворот изображения» позволило проверить степень защиты при различных вариантах искажения: при повороте на 9 градусов, 60 градусов и 180 градусов и показало, что распознавание управляющего сигнала не осуществилось при 60-градусном повороте. Это объясняется алгоритмом встраивания ЦВЗ, который основан на последовательном распределении бит в четырех сегментах изображения, часть из которых оказывается «обрезанными» при повороте более чем на 15 градусов в любую из сторон. Таким образом, можно сделать вывод, что метод устойчив к искажениям изображений путем поворота на 0-

15, 165-195, 345-375 градусов из-за потери значительной части изображения в иных случаях, то есть потери самой передаваемой информации. Эксперимент с JPEG-сжатием объекта показал также устойчивость подхода к такой атаке. Атака злоумышленника, результатом которой является потеря передаваемого изображения, легко обнаруживается на начальных этапах и не может оказаться незамеченной. Для решения такой проблемы должны применяться дополнительные средства противодействия атакам. При это можно констатировать, что предлагаемый метод устойчив к рассмотренным атакам для решения поставленных задач маскирования управляющих сигналов агентов в мобильных робототехнических группах с сетевым управлением даже при частичной потере или искажении части передаваемой информации.

Выводы

В современной прикладной робототехнике эффективного решения многих задач возможно достичь только при групповом взаимодействии роботов [20]. Предложенный подход и основанный на нем алгоритм позволяют скрыть факт передачи управляемых сигналов робототехническим системам. Опубликованные в статье результаты проведенных экспериментальных вычислений позволяют сделать вывод об устойчивости предлагаемого подхода перед преднамеренными сторонними атаками на передаваемые сигналы, а также перед случайными возможными искажениями при обмене данными. Преимуществом алгоритма перед аналогичными алгоритмами криптографии или классической стеганографии является и

тот факт, что нет необходимости на 100% корректного извлечения встроженных данных, в то время как в методах криптографии и классической стеганографии каждый бит информации крайне важен для распознавания конечного сигнала [21]. Описанный в статье подход позволил повысить скорость формирования ЦВЗ за счет адаптивной ширины информативного кольца, повысить скорость обработки стегоконтейнера и встраивания ЦВЗ благодаря обработке части объекта, снизить вносимые искажения в стегоизображение, относительно предыдущих исследований [22]. Предложенный подход и полученные результаты могут быть использованы для формирования защищенных механизмов межмашинного обмена данными между агентами в групповых робототехнических системах.

Список литературы

1. Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И. Реконфигурация каналов связи при управлении смешанными группировками робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. №2 (187). С. 266–278.
2. Подходы к формированию единого информационного-управляющего поля смешанных робототехнических группировок / А.С. Сигов, В.В. Нечаев, В.В. Баранюк, О.С. Смирнова // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2016. №1. С. 146–151.
3. The cybersecurity in development of IoT embedded technologies / B. Usmonov, O. Evsutin, A. Iskhakov, A. Shelupanov, A. Iskhakova, R. Meshcheryakov // Proceedings of the International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT, 2017). 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICISCT.2017.8188589>.
4. Использование тепловой карты поведения пользователя в задаче идентификации субъекта инцидента информационной безопасности / А. Ю. Исхаков, А. О. Исхакова, Р. В. Мещеряков, Р. Бендрау, О. Мелехова // Труды СПИИРАН. 2018. № 6 (61). С. 147-171. <https://doi.org/10.15622/sp.61.6>.

5. Зикратов И.А., Козлова Е.В., Зикратова Т.В. Анализ уязвимостей робототехнических комплексов с роевым интеллектом. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. №5 (87). С. 149–154.
6. Method of Verification of Robotic Group Agents in the Conditions of Communication Facility Suppression / A. Iskhakova, A. Iskhakov, R. Meshcheryakov, E. Jharko // *IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52, no. 13. P. 1397-1402. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.394>
7. Конахович Г.Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: МК-Пресс, 2006. 288 с.
8. Евсютин О.О., Кокурина А.С., Мещеряков Р.В. Обзор методов встраивания информации в цифровые объекты для обеспечения безопасности в «интернете вещей» // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43. № 1. С. 137–154. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-1-137-154>.
9. Федосеев В.А. Цифровые водяные знаки и стеганография. Самара: СГАУ, 2015. 128 с.
10. Евсютин О.О., Кокурина А.С., Мещеряков Р.В. Стеганографическое встраивание дополнительных данных в снимки дистанционного зондирования земли с помощью метода QIM с переменным шагом квантования в частотной области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330, № 8. С. 155–162. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2221>.
11. Подход к извлечению робастного водяного знака из изображений, содержащих текст / А. В. Козачок, С. А. Копылов, Р. В. Мещеряков, О. О. Евсютин, Л.М. Туан // *Труды СПИИРАН*. 2018. № 5(60), С. 128-155. <https://doi.org/10.15622/sp.60.5>.
12. Robust Watermarking Method in DFT Domain for Effective Management of Medical Imaging / M. Cedillo-Hernandez, F. Garcia-Ugalde, M. Nakano-Miyatake, H. Perez-Meana // *Signal, Image and Video Processing*. 2015. Vol. 9. P.1163–1178.
13. Ridzon R., Levicky D. Content Protection in Grayscale and Color Images Based on Robust Digital Watermarking // *Telecommunication Systems*. 2013. Vol. 52. P.1617–1631.
14. Gaata M. T. An Efficient Image Watermarking Approach based on Fourier Transform // *International Journal of Computer Applications*. 2016. Vol. 136(9). P.8–11.
15. Шумская О.О., Будков В.Ю. Сравнительное исследование методов классификации в стегоанализе цифровых изображений // *Научный вестник НГТУ*. 2018. № 3 (72). С. 121–134. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2018-3-121-134>.
16. Solachidis V., Pitas I. Circularly Symmetric Watermark Embedding in 2-D DFT Domain // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2001. Vol. 10. P. 1741–1753.
17. Poljicak A., Mandic L., Agic D. Discrete Fourier Transform-based Watermarking Method with an Optimal Implementation Radius // *Journal of Electronic Imaging*. 2011. Vol. 20. P. 033008-1–033008-8.
18. Mandal J.K., Khamrui A. A Genetic Algorithm Based Steganography in Frequency Domain (GASFD) // *International Conference on Communication and Industrial Application*. 2011. P. 1–4.

19. Image Data Hiding Technique Using Discrete Fourier Transformation / D. Bhattacharyya, T. Kim, H. Adeli, R.J. Robles, M. Balitanas // *Communications in computer and information science*. 2011. Vol. 151. P. 315–323.

20. Ронжин А.Л., Юсупов Р.М. Многомодальные интерфейсы автономных мобильных робототехнических комплексов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 1 (162). С. 195–206.

21. Шумская О.О., Железны М. Адаптивный алгоритм встраивания информации в сжатые JPEG-изображения на основе операции замены // *Информационно-управляющие системы*. 2018. № 5. С. 44–56. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-44-56>.

22. Shumskaya O.O., and Iskhakova A.O. Application of digital watermarks in the problem of operating signal hidden transfer in multi-agent robotic system // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2019. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2019.8729669>.

References

1. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I. Rekonfiguratsiya kanalov svyazi pri upravlenii smeshannymi gruppировkami robototekhnicheskikh kompleksov [Reconfiguration of communication channels during control of mixed groups of robotic complexes]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2017, no. 2 (187), pp. 266–278 (In Russ.).

2. Sigov A.S., Netchaev V.V., Barabyuk V.V., Smirnova O.S. Podkhody k formirovaniyu edinogo informatsionnogo-upravlyayushchego polya smeshannykh robototekhnicheskikh gruppировок [Approaches to formation of single information and control field of mixed robotics groupings]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technology and IT-education*. 2016. no.1, pp. 146–151 (In Russ.).

3. Usmonov B., Evsutin O., Iskhakov A., Shelupanov A., Iskhakova A., Meshcheryakov R. The cybersecurity in development of IoT embedded technologies. *Proceedings of the International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT, 2017)*, 2017, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICISCT.2017.8188589>.

4. Iskhakov A. Y., Iskhakova A. O., Meshcheryakov R. V., Bendraou R., Melekhova O. Ispol'zovanie teplovoi karty povedeniya pol'zovatelya v zadache identifikatsii sub"ekta intsidenta informatsionnoi bezopasnosti [Application of User Behavior Thermal Maps for Identification of Information Security Incident]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2018, no. 6(61), pp. 147-171. <https://doi.org/10.15622/sp.61.6> (In Russ.).

5. Zikratov I.A., Kozlova E.V., Zikratova T.V. Analiz uyazvimostei robototekhnicheskikh kompleksov s roevym intellektom [Analysis of vulnerabilities of robotic complexes with Swarm intelligence]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii*,

mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, no.5 (87), pp. 149–154 (In Russ.).

6. Iskhakova A., Iskhakov A., Meshcheryakov R., Jharko E. Method of Verification of Robotic Group Agents in the Conditions of Communication Facility Suppression. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, vol. 52, no. 13, pp. 1397-1402. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.394>

7. Konahovitch G.F. Komp'yuternaya steganografiya [Computer steganography]. *Teoriya i praktika = Theory and Practice*. Kiev, MK-Press Publ., 2006, 288 p. (In Russ.).

8. Evsyutin O.O., Kokurina A.S., Meshcheryakov R.V. Obzor metodov vstraivaniya informatsii v tsifrovye ob"ekty dlya obespecheniya bezopasnosti v «internete veshchei» [A review of the methods of embedding information in digital objects for security in the Internet of things]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*. 2019, vol. 43(1), pp. 137–154. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-1-137-154> (In Russ.).

9. Fedoseev V.A. *Tsifrovye vodyanye znaki i steganografiya* [Digital watermarks and steganography]. Samara, SSAU Publ., 2015, 128 p. (In Russ.).

10. Evsyutin O.O., Kokurina A.S., Meshcheryakov R.V. Steganograficheskoe vstraivanie dopolnitel'nykh dannykh v snimki distantsionnogo zondirovaniya zemli s pomoshch'yu metoda QIM s peremennym shagom kvantovaniya v chastotnoi oblasti [Steganographic embedding of additional data into the images of earth remote sensing by QIM method with a variable quantization step in the frequency domain]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330. 8, pp. 155–162. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2221> (In Russ.).

11. Kozachok A.V., Kopylov S.A., Meshcheryakov R.V., Evsutin O.O., Tuan L.M. Podkhod k izvlecheniyu robustnogo vodyanogo znaka iz izobrazhenii, sodержashchikh tekst [An approach to a robust watermark extraction from images containing text]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 5(60), pp. 128-155. <https://doi.org/10.15622/sp.60.5>. (In Russ.).

12. Cedillo-Hernandez M., Garcia-Ugalde F., Nakano-Miyatake M., and Perez-Meana H. Robust Watermarking Method in DFT Domain for Effective Management of Medical Imaging. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, vol. 9, pp.1163–1178.

13. Ridzon R., and Levicky D. Content Protection in Grayscale and Color Images Based on Robust Digital Watermarking. *Telecommunication Systems*, 2013, vol. 52, pp.1617–1631.

14. Gaata M. T. An Efficient Image Watermarking Approach based on Fourier Transform. *International Journal of Computer Applications*, 2016, vol. 136(9), pp.8–11.

15. Shumskaya O.O., Budkov V.Yu. Sravnitel'noe issledovanie metodov klassifikatsii v stegoanalize tsifrovyykh izobrazhenii [Comparative study of classification methods in the stegoanalysis of digital images]. *Nauchnyi vestnik NGTU = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2018, vol. 3 (72), pp. 121–134. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2018-3-121-134> (In Russ.).

16. Solachidis V., and Pitas I. Circularly Symmetric Watermark Embedding in 2-D DFT Domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, vol. 10, pp. 1741–1753.

17. Poljicak A., Mandic L., and Agic D. Discrete Fourier Transform-based Watermarking Method with an Optimal Implementation Radius. *Journal of Electronic Imaging*, 2011, vol. 20, pp. 033008-1–033008-8.

18. Mandal J.K., Khamrui A. A Genetic Algorithm Based Steganography in Frequency Domain (GASFD). *International Conference on Communication and Industrial Application*, 2011, pp. 1–4.

19. Bhattacharyya D., Kim T., Adeli H., Robles R.J., and Balitanas M. Image Data Hiding Technique Using Discrete Fourier Transformation. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, vol. 151, pp. 315–323.

20. Ronzhin A.L., Yusupov R.M. Mnogomodal'nye interfeisy avtonomnykh mobil'nykh robototekhnicheskikh kompleksov [Multi-modal interfaces of autonomous mobile robotics systems]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015, no. 1 (162), pp. 195–206 (In Russ.)

21. Shumskaya O.O., Zelezny M. Adaptivnyi algoritm vstraivaniya informatsii v szhatye JPEG-izobrazheniya na osnove operatsii zameny [Adaptive algorithm of replacement-based embedding of data into compressed JPEG images]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2018, vol. 5, pp. 44–56. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-44-56> (In Russ.)

22. Shumskaya O.O., and Iskhakova A.O. Application of digital watermarks in the problem of operating signal hidden transfer in multi-agent robotic system. *2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. 2019. doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729669.

Информация об авторах / Information about the Authors

Шумская Ольга Олеговна, аспирант,
Санкт-Петербургский институт
информатики и автоматизации
Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,
e-mail: shumskaya.oo@gmail.com

Olga O. Shumskaya, Post-Graduate
Student, St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy
of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: shumskaya.oo@gmail.com

Исхакова Анастасия Олеговна, кандидат
технических наук, старший научный сотрудник,
лаборатория киберфизических систем,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Институт проблем
управления им. В.А. Трапезникова РАН»,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: iskhakova.ao@gmail.com

Anastasia O. Iskhakova, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor Senior
Researcher, Cyberphysical Systems Laboratory,
Russian Academy of Sciences, Institute of Man-
agement Problems named after
V.A. Trapeznikova RAS,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: iskhakova.ao@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-153-169>



Разработка авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок

И.О. Кирильчук¹ ✉, А.В. Иорданова¹, В.В. Юшин¹, В.М. Попов¹

¹ ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
ул. 50 лет Октября 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Целью данной статьи является разработка метода построения маршрута ликвидации стихийно образующихся несанкционированных свалок на территории муниципального образования субъекта Российской Федерации.

Методы. Разработка метода построения маршрутов ликвидации несанкционированных свалок базируется на теории графов, включающей алгоритмы нахождения кратчайшего пути: алгоритм Дейкстры, алгоритм Флойда-Уоршелла, алгоритм Форда-Беллмана, цикл Гамильтона и др. Проведя анализ особенностей использования перечисленных алгоритмов, авторами разработан метод составления маршрута ликвидации несанкционированных свалок на основе Гамильтонова цикла.

Результаты. Задача построения маршрута сводится к выбору тех несанкционированных свалок из обнаруженных, которые будут приняты в качестве вершин графа, между которыми необходимо найти кратчайший путь. Авторский подход к формированию набора вершин графа состоит в следующем. На первом этапе задаются начальные и граничные условия. В качестве нулевой вершины графа выбирается стоянка спецтехники (мусоровозов), в качестве последней (n-ой) вершины – полигон ТКО. При этом необходимо учесть, что после транспортировки отходов со свалок к месту их захоронения (полигону), мусоровоз должен вернуться к месту стоянки. Учитываемыми ограничениями являются максимальное расстояние, которое может без дозаправки проехать мусоровоз, и объем кузова мусоровоза. Далее в качестве первой вершины графа выбирается наиболее близкая к отправной точке несанкционированная свалка, представляющая наибольшую опасность для окружающей среды. В качестве второй и т.д. вершин выбираются ближайшие к первой вершине несанкционированные свалки. Поиск вершин продолжается до тех пор, пока выполняются неравенства, учитывающие заданные ограничения. Далее происходит формирование графа, матрицы смежности, построение маршрута. При таком подходе для построения маршрута оптимальным является использование цикла Гамильтона, который обеспечивает нахождение минимального пути между всеми вершинами графа и возвращается в исходную точку.

Заключение. Применение авторского метода для составления маршрутов ликвидации несанкционированных свалок позволит оперативно осуществлять уборку обнаруженных в черте города несанкционированных свалок, что существенно снизит экологическую нагрузку на окружающую природную среду.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы; несанкционированные свалки; маршрут ликвидации; граф; матрица смежности; цикл Гамильтона.

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

© Кирильчук И.О., Иорданова А.В., Юшин В.В., Попов В.М., 2020

Финансирование. Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.

Для цитирования: Разработка авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок / И.О. Кирильчук, А.В. Иорданова, В.В. Юшин, В.М. Попов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(2): 153-169. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-153-169>.

Поступила в редакцию 10.02.2020

Подписана в печать 31.03.2020

Опубликована 20.04.2020

Development of the Authors' Method for Arranging Routes for Elimination of Unauthorized Dumps

Iraida O. Kirilchuk ¹ ✉, Anastasia V. Iordanova ¹, Vasily V. Yushin ¹,
Victor M. Popov ¹

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

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Abstract

Purpose of research is to develop a method for arranging routes for elimination of spontaneously formed unauthorized dumps on the territory of a municipal formation of a constituent entity of the Russian Federation.

Methods. The development of a method for arranging routes for elimination of unauthorized dumps is based on the theory of graphs, which includes algorithms for finding the shortest path: Dijkstra's algorithm, Floyd-Warshall algorithm, Ford-Bellman algorithm, Hamiltonian cycle, etc. Having analyzed the peculiarities of using the listed algorithms, the authors have developed a method for arranging a route for the elimination of unauthorized dumps based on the Hamiltonian cycle.

Results. The task of arranging a route is reduced to choosing those unauthorized dumps from the detected ones, which will be accepted as the vertices of the graph, between which it is necessary to find the shortest path. The authors' approach to the formation of a set of vertices of the graph is as follows. At the first stage, the initial and boundary conditions are set. The parking of special equipment (garbage trucks) is selected as the zero vertex of the graph, and the SMW polygon is selected as the last (n^{th}) vertex. In this case, it should be taken into account that after transporting waste from dumps to the place of their burial (landfill), the garbage truck must return back to the parking place. The limits taken into consideration are the maximum distance that the garbage truck can travel without refueling and the volume of the garbage truck body. Then, the closest to the starting point unauthorized dump which represents the greatest danger to the environment is chosen as the first vertex of the graph. An unauthorized dump closest to the first peak is chosen as the second, etc.. The search for vertices continues until the inequalities that take into account the given constraints are satisfied. Next, a graph, an adjacency matrix, and a route are formed. With this approach, for arranging a route, it is optimal to use the Hamiltonian cycle, which ensures finding the minimum path between all the vertices of the graph and returns to the starting point.

Conclusion. Application of the authors' method for arranging routes for elimination of unauthorized dumps will make it possible to promptly clean up unauthorized dumps found in the city, which will significantly reduce the environmental load.

Keywords: solid municipal waste; unauthorized dumps; route for elimination; graph; adjacency matrix; Hamiltonian cycle.

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 as part of a Grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists МК-941.2019.5.

For citation: Kirilchuk I. O., Iordanova A.V., Yushin V. V., Popov V. M. Development of the Authors' Method for Arranging Routes for Elimination of Unauthorized Dumps // *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(2): 153-169 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-2-153-169>.

Received 10.02.2020

Accepted 31.03.2020

Published 20.04.2020

Введение

В соответствии с ежегодными Государственными докладами обстановка с управлением отходами является весьма неутешительной и имеет тенденцию к ухудшению – кроме стабильного увеличения числа отходов, каждый год возрастают расходы на перевозку, переработку и размещение промышленных и твердых коммунальных отходов [1].

На территории Российской Федерации максимальное число отходов формируется в крупных агломерациях, где сконцентрированы промышленные предприятия и урбанизированные территории. Это приводит к засорению пригородных участков и прилегающих к муниципальным округам естествен-

ных ландшафтов как промышленными отходами (возле мест их образования), так и твердыми коммунальными отходами. Особую опасность представляют несанкционированные свалки, которые являются одним из значимых факторов техногенного воздействия [2-4].

Количество несанкционированных свалок также продолжает неуклонно расти. При этом, если не предпринять каких-либо действенных мер по борьбе с образованием стихийных свалок, размер прошлого экологического ущерба в количественном отношении может возрасти почти до 22 тысяч несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов. Воздействие несанкционированных свалок на окружающую природную среду представлено на рис. 1.

Компоненты окружающей среды	Виды воздействия	Последствия
Атмосферный воздух	Выделяются в воздух вредные и дурнопахнущие газы: - окислы азота; окись углерода; фенол; аммиак; сероводород; толуол; ксилол, скатол, метан, меркаптан, водород, ртуть металлическая, бензол, трихлорметан, 4-х хлористый углерод, хлорбензол. Создают опасность пожаров.	Загрязнение атмосферного воздуха. Накопление токсичных веществ в растительном сообществе. Уничтожение растительности и почвенной биоты вследствие пожаров, возникающих на свалках. Загрязнение почвенного слоя вследствие выпадения загрязненных осадков.
Поверхностные водные источники	В результате миграции с водными потоками - загрязнение поверхностных вод азотистыми, хлорсодержащими, сульфатными и др. соединениями, ухудшение качества водных ресурсов: повышение минерализации, жесткости воды, повышенные значения тяжелых металлов в воде и донных отложениях, повышение ХПК.	Ограничения водопользования, сокращение водной биоты
Грунтовые воды	Проникновение в водоносные горизонты загрязняющих веществ. Бактериологическое загрязнение.	Ограничение водопользования, хозяйственного использования вод.
Почвы	Нагревание, отложение пыли, уплотнение почвы, эвтрофизация при активном разложении мусора, дефицит воздуха в почве	Изъятие земель из сельскохозяйственного оборота. Затраты на восстановление земель. Гибель почвенных бактерий, насекомых. Мутации в растительном сообществе.
Растительность	Увеличивает содержание в листьях и ветвях тяжелых металлов, которые воздействуют на клеточный метаболизм, затрудняя дыхание растений.	Распространение и массовый рост эвритопных (растущих повсеместно) рудеральных (мусорных) растений и вымирание неустойчивых видов. Сокращение выпасов. Загрязнение продуктов растениеводства.
Животные	Распространение животных, переносчиков бактериологического заражения: грызунов, насекомых, птиц.	Дисбаланс видового состава насекомых, птиц и других животных. Рост инфекционных заболеваний.

Рис. 1. Воздействие несанкционированных свалок на компоненты окружающей среды

Fig.1. The impact of the unauthorized dumps on the environment

Все вышесказанное подтверждает наличие проблемы, оставление которой без решения может привести к реальной угрозе причинения непоправимого вреда окружающей среде. В связи с этим остро встает вопрос о необходимости оперативного обнаружения и ликвидации образующихся несанкционированных свалок. При этом решение данной проблемы требует комплексного и системного подхода.

Таким образом, **цель исследования** состоит в разработке метода построения оптимального маршрута ликвидации стихийно образующихся несанкциониро-

ванных свалок на территории муниципального образования субъекта Российской Федерации.

Большинство логистических систем при построении маршрутов используют различные алгоритмы обхода вершин в графе [5]. К настоящему времени накоплен значительный опыт применения указанных алгоритмов для решения разнообразных прикладных задач [6-9]. На основе данных исследований можно провести анализ особенностей использования алгоритмов для построения маршрутов между заданными точками (табл. 1).

Таблица 1. Анализ особенностей использования алгоритмов нахождения пути

Table 1. Analysis of the use of path finding algorithms

Название алгоритма	Характеристика найденного пути	Направление поиска	Анализ стоимости пройденного пути
Поиск в ширину	Находит кратчайший путь	Поиск по всем направлениям	Ортогональные и диагональные шаги равны
Поиск в глубину	Найденное решение не всегда является кратчайшим маршрутом	Поиск в направлении соседней вершины, находящейся ближе к цели	Возможна оценка стоимости пройденного пути
Лучший-первый	Найденное решение не всегда является кратчайшим маршрутом	Поиск по прямой к цели	Не учитываются накопленная стоимость пути и особенности местности
Разделяй и властвуй	Найденное решение не всегда является кратчайшим маршрутом	Поиск по прямой к цели	Не учитываются накопленная стоимость пути и особенности местности
Алгоритм Дейкстры	Находит кратчайший путь	Поиск по всем направлениям	Оценка стоимости пройденного пути с учетом особенностей местности
Волновой алгоритм	Находит кратчайший путь	Поиск по всем направлениям	Ортогональные и диагональные шаги равны
Алгоритм A*	Находит кратчайший путь	Поиск по прямой к цели	Оценка стоимости пройденного пути с учетом особенностей местности

Анализ последних исследований в рассматриваемой предметной области позволил выделить работу [10], в которой авторы для решения поставленной задачи, т.е. составления маршрута сбора и транспортировки отходов, используют модифицированный алгоритм Дейкстры.

Алгоритм Дейкстры – один из самых распространенных алгоритмов нахождения кратчайшего маршрута. Его суть заключается в составлении матрицы смежности путем последовательного просчета всех ближайших к начальной точек и сопоставления весов ребер графа (в нашем случае – расстояний между свалками) для выбора наименьшего значения. В данном алгоритме веса ребер принимать отрицательные значения не могут. Количество операций, за которое алгоритм находит кратчайший маршрут, определяется как n^2 , где n – количество верши графа [6].

На основе анализа результатов исследования основных характеристик различных методов поиска кратчайшего пути в графе, проведенного в [11], возможно оценить время работы алгоритма Дейкстры в зависимости от количества вершин графа (табл. 2).

Таким образом, использование алгоритма Дейкстры является оптимальным для решения задач нахождения кратчайшего пути в неориентированных графах с различными весами.

Таблица 2. Зависимость оперативности построения маршрута с использованием алгоритма Дейкстры [11]

Table 2. Dependence of the promptness of arranging route using Dijkstra's algorithm

Количество вершин	Время работы алгоритма, с
1000	1,6
2000	6,5
4000	26
8000	105
10000	163,8

Материалы и методы

В условиях ограниченных финансовых ресурсов возникает необходимость разработки приоритетов экологической политики. Применительно к рассматриваемой нами цели построения оптимального маршрута для устранения несанкционированных свалок это означает, что при ограничениях, которыми являются максимальное расстояние, которое может без дозаправки проехать мусоровоз, и объем кузова мусоровоза, первоочередной ликвидации должны быть подвергнуты наиболее опасные с экологической точки зрения несанкционированные свалки.

На основе данных, предоставляемых интернет-порталом по учету стихийных несанкционированных свалок (<http://dev.swsu.ru/>) формируются двумерные массивы стихийных несанкционированных свалок, содержащие расстояния между ними и основные характеристики свалок, которые будут учитываться при составлении маршрута

(класс экологической опасности свалки и ее объем) [12-15]. Задача построения маршрута сводится к выбору тех несанкционированных свалок из обнаруженных, которые будут приняты в качестве вершин графа, между которыми необходимо построить оптимальный маршрут.

Авторский подход к формированию набора вершин графа состоит в следующем.

На первом этапе задаются начальные и граничные условия. В качестве нулевой вершины графа выбирается стоянка спецтехники (мусоровозов), в качестве последней (n-ой) вершины – полигон ТКО. При этом необходимо учесть, что после транспортировки отходов со свалок к месту их захоронения (полигону), мусоровоз должен вернуться к месту стоянки.

Учитываемыми ограничениями, как было указано выше, являются: максимальное расстояние, которое может без дозаправки проехать мусоровоз (R_{max}), и объем кузова мусоровоза (V_{max}).

Вторым шагом является поиск первой вершины. В качестве первой вершины графа выбирается наиболее близкая к отправной точке несанкционированная свалка, представляющая наибольшую опасность для окружающей среды, то есть имеющая наименьшее значение класса экологической опасности:

$$R_{0-1} = \min \text{ и } K_1 = \min.$$

Если объем свалки (V_1) не превышает объем мусоровоза, а суммарное

расстояние от начальной точки до свалки, от свалки до полигона и от полигона до стоянки спецтехники не превышает R_{max} , то есть одновременно выполняются следующие неравенства:

$$V_{max} > V_1$$

$$R_{max} > R_{0-1} + R_{1-n} + R_{n-0},$$

то переходим к третьему шагу, иначе к четвертому шагу (строим маршрут между заданными вершинами графа).

Третий этап заключается в поиске второй и последующих вершин графа. В качестве второй и т.д. вершин выбираются ближайшие к первой вершине несанкционированные свалки. Поиск вершин продолжается до тех пор, пока выполняются неравенства, учитывающие суммарный объем свалок и расстояния между ними.

Четвертый шаг состоит в формировании графа, матрицы смежности, построении маршрута. В случае, если к 4-му шагу переходим, минуя 3-й, то маршрут строится только между вершинами 0-1-n.

Таким образом, для нахождения маршрута ликвидации отобранных с использованием авторского подхода свалок необходимо использовать алгоритмы построения оптимального маршрута, к которым относятся алгоритмы решения транспортных задач (задача коммивояжера, задача кольцевого маршрута).

Для решения подобного рода задач наибольшее распространение в настоящее время получили следующие алгоритмы: муравьиный, генетический, а

также метод полного перебора и метод ветвей и границ. Особенности использования данных методов и алгоритмов рассмотрены в работах [16-20]. Необходимо отметить, что эффективность работы муравьиного и генетического алгоритмов возрастает с увеличением количества вершин графа, в то время как использование методов ветвей и границ и полного перебора не приводит к решению задачи нахождения оптимального маршрута. Однако экспериментальные исследования возможностей использования данных методов и алгоритмов в задачах построения маршрута

ликвидации стихийных несанкционированных свалок показали, что в рамках одного маршрута возможно ликвидировать не более 10 свалок в связи с ограниченным объемом кузова мусоровоза. Таким образом, проведем сравнительный анализ количественных характеристик перечисленных методов построения оптимального маршрута в графе с десятью вершинами (табл. 3.).

В связи с вышеизложенным в предлагаемом авторами методе нахождение оптимального маршрута осуществляется посредством поиска цикла Гамильтона с использованием метода ветвей и границ.

Таблица 3. Сравнительный анализ методов построения оптимального маршрута для 10 вершин

Table 3. Comparative analysis of the methods for arranging an optimal route for 10 vertexes

№	Наименование метода/алгоритма	Характеристики	
		Длина маршрута, км	Время решения, мин
1	Муравьиный алгоритм	33	1,1
2	Генетический алгоритм	34	1,3
3	Метод полного перебора	32	0,39
4	Метод ветвей и границ	33	0,042

Алгоритм формирования оптимального маршрута по авторскому методу представлен на рис. 2. Алгоритм поиска цикла Гамильтона в графе представлен на рис. 3.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим пример использования предложенного авторами подхода к построению маршрута ликвидации стихийных свалок. Пусть в качестве вер-

шин графа было отобрано 5 несанкционированных свалок. Учитывая нулевую вершину (стоянку спецтехники) и последнюю (полигон ТКО), общее количество вершин сформированного графа будет равно 7.

Матрица смежности, содержащая веса ребер графа, то есть расстояния между его вершинами (несанкционированными свалками), представлена в табл. 4.

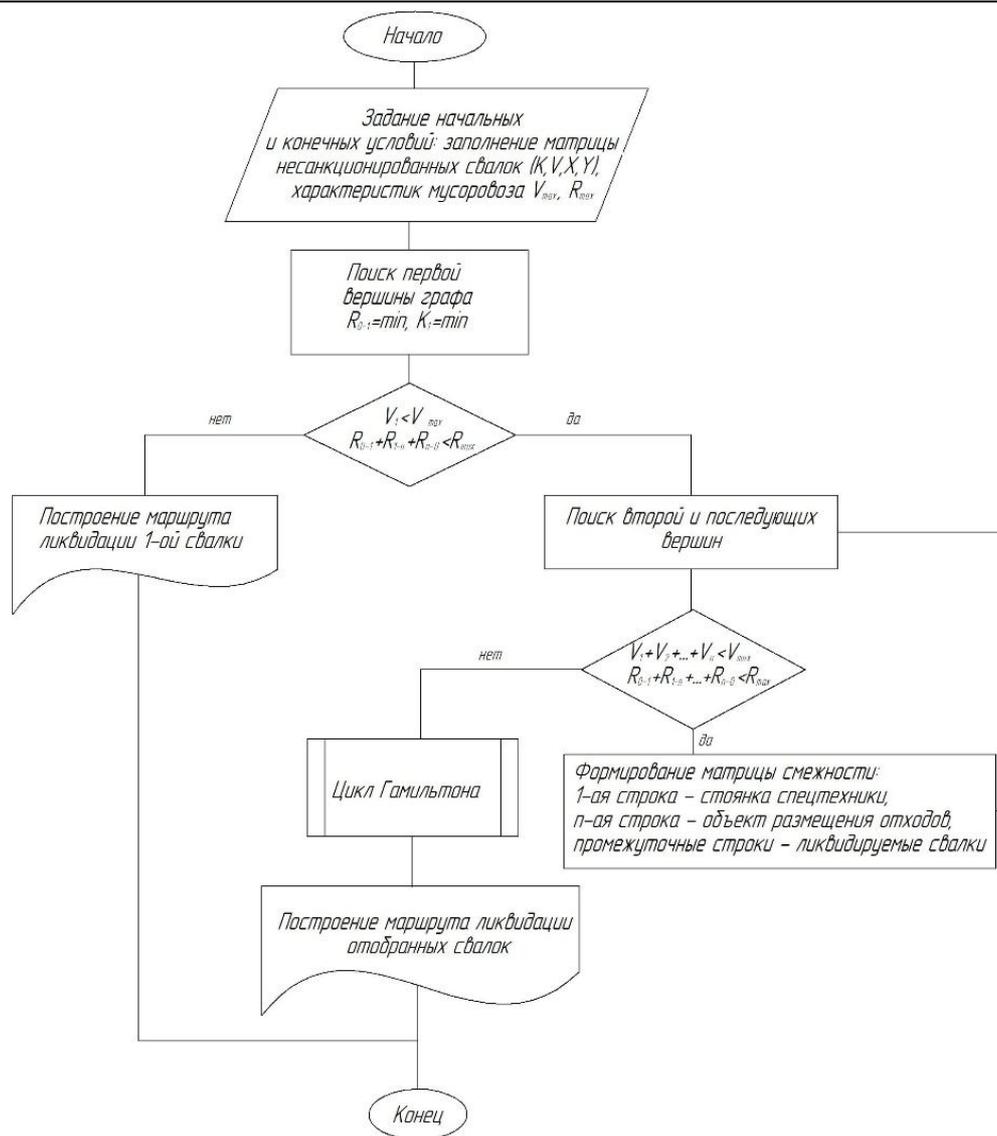


Рис. 2. Алгоритм формирования маршрута

Fig. 2. The algorithm for the route formation

Таблица 4. Матрица смежности сформированного графа

Table 4. Adjacency matrix of the formed graph

	0	1	2	3	4	5	6 (n)
0	0	1	0	0	0	3	7
1	1	0	0	3	0	5	0
2	0	0	0	0	4	3	7
3	0	3	0	0	5	1	0
4	0	0	4	5	0	3	0
5	3	5	3	1	3	0	6
6 (n)	7	0	7	0	0	6	0

То есть оптимальный маршрут ликвидации обнаруженных несанкционированных свалок будет проходить через следующие точки: $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 6(n) \rightarrow 0$.

Проведем экспериментальную проверку разработанного авторами метода построения оптимального маршрута ликвидации стихийных несанкционированных свалок в центральном и железнодорожном округе города Курска.

Как было отмечено выше, апробация предлагаемого подхода на основе формирования графа, где вершинами являются несанкционированные свалки, позволяет судить, что с учетом задан-

ных ограничений, строятся графы малого веса, имеющие не более 10 вершин. Пример реализации авторского подхода представлен на рис. 6 и 7.

Нахождение весов ребер графа, то есть длины пути от нулевой вершины (стоянка спецтехники) до первой вершины графа (несанкционированная свалка с наивысшим классом экологической опасности) и последующих осуществляется с использованием стандартных средств построения маршрутов, реализующих модифицированный алгоритм Дейкстры («Маршрутер», «ГИС Панорама» и т.п.).

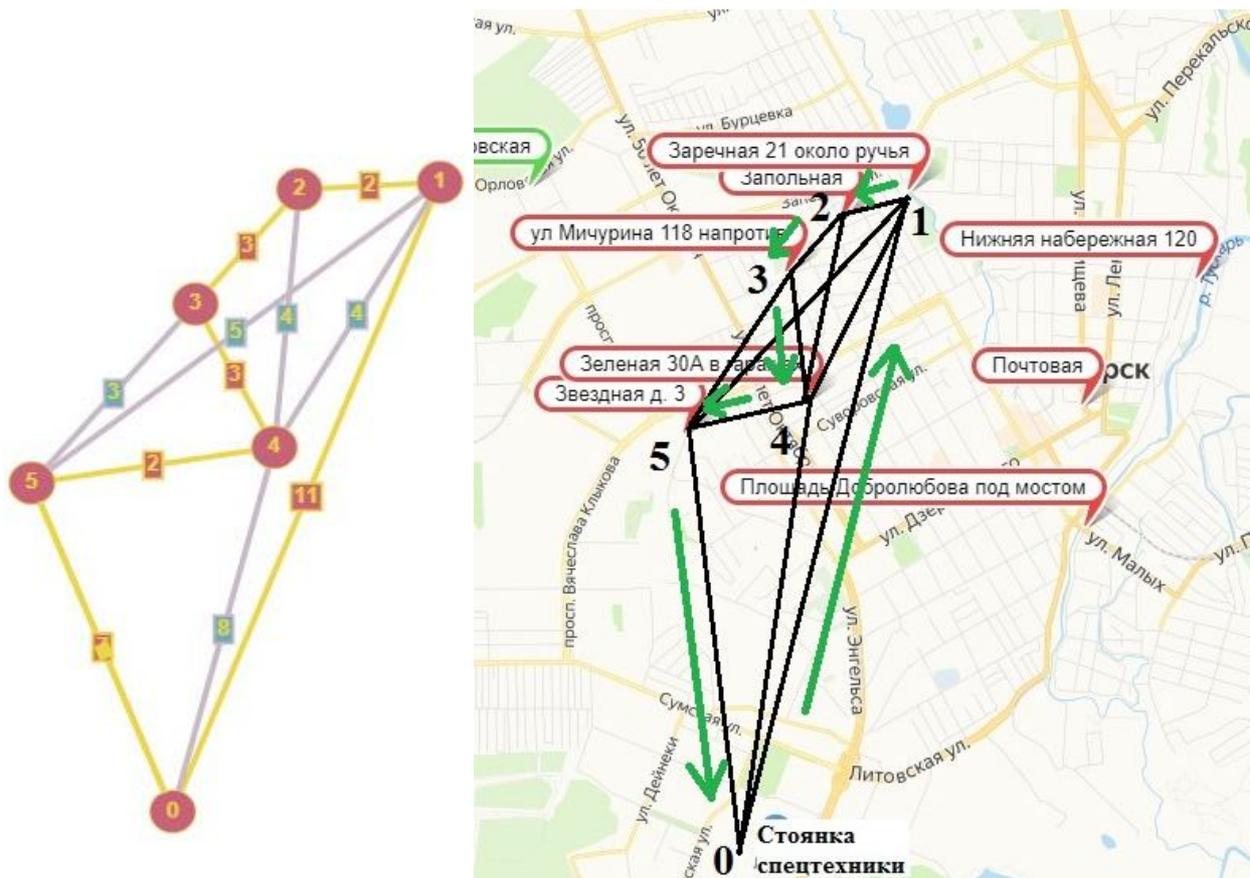


Рис. 6. План маршрута санитарной уборки несанкционированных свалок в Центральном округе г. Курска

Fig. 6. Route plan for sanitary cleaning of unauthorized dumps in the Kursk Central district

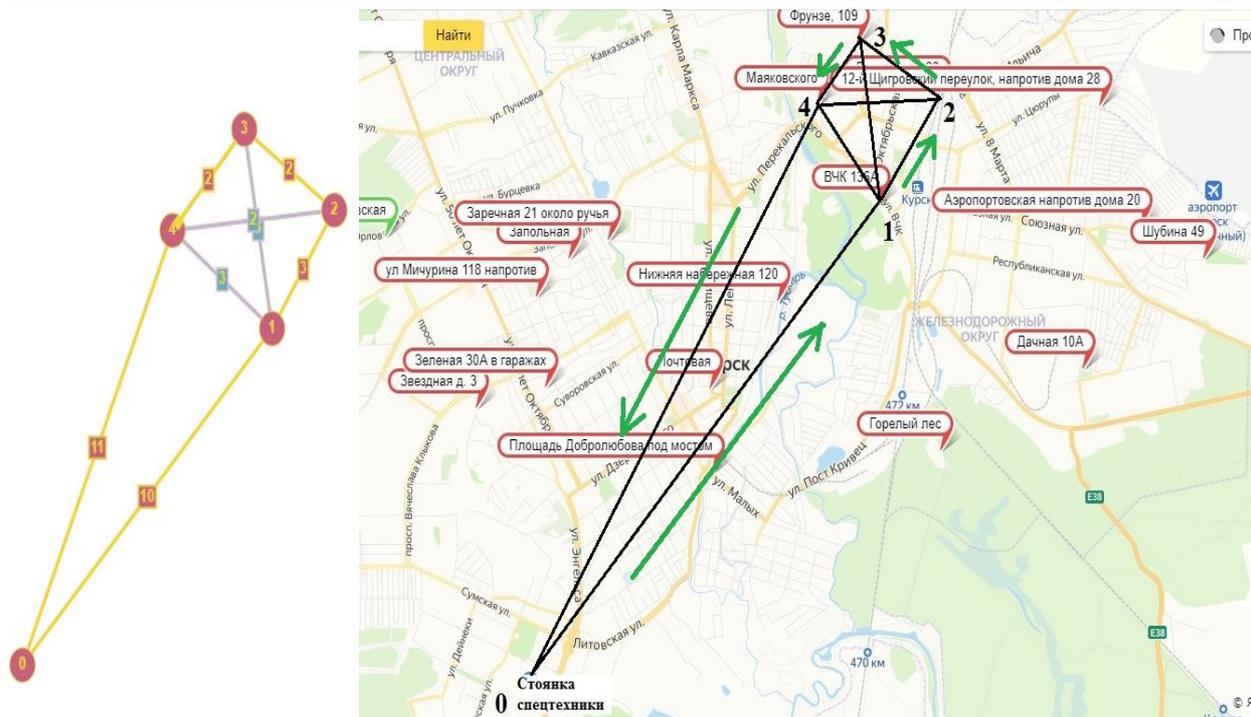


Рис. 7. План маршрута санитарной уборки несанкционированных свалок в Железнодорожном округе г. Курска

Fig. 7. Route plan for sanitary cleaning of unauthorized dumps in the Kursk Railway district

На заключительном этапе исследования проведен сравнительный анализ авторского метода построения маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок и модифицированно-

го алгоритма Дейкстры, используемого для составления маршрута сбора и транспортировки отходов в [11]. Результаты анализа представлены в табл. 5.

Таблица 5. Сравнительный анализ алгоритмов на примере ликвидации свалок в Железнодорожном и Центральном округе г. Курска

Table 5. Comparative analysis of the algorithms considering dumps elimination in the Railway and Central districts of Kursk

Наименование округа	Наименование алгоритма	Характеристики				
		Длина маршрута, км	Время работы алгоритма, сек	Кол-во убранного мусора, м ³	Ликвидированные свалки	Класс опасности свалки
Железнодорожный	Авторский метод	28	3	19	Ул. ВЧК, 136а	1
					Ул. Вокзальная, 33	2
					Ул. Фрунзе, 109	3
					Ул. Маяковского	3
	Алгоритм Дейкстры	20	0,03	18	Ул. Пост Кривец 11в	3
					Горелый лес	2
					Ул. Соловьиная, 32	5
				Ул. Новоселовка, 54	4	

Наименование округа	Наименование алгоритма	Характеристики				
		Длина маршрута, км	Время работы алгоритма, сек	Кол-во убранного мусора, м ³	Ликвидированные свалки	Класс опасности свалки
Центральный	Авторский метод	28	3,5	20	Ул. Заречная, 21	1
					Ул. Запольная	2
					Ул. Мичурина, 118	2
					Ул. Зеленая, 30 А	3
	Алгоритм Дейкстры	23	0,04	18	Ул. Звездная, 3	4
					Ул. Добролюбова	2
					Ул. Почтовая	2
					Ул. Зеленая, 30 А	3
				Ул. Звездная, 3	4	

Экспериментальная проверка рассмотренных алгоритмов на примере построения маршрутов на территории г. Курска показала, что при использовании авторского метода первой вершиной является свалка с наибольшим классом экологической опасности, а при использовании алгоритма Дейкстры первой вершиной является ближайшая к стоянке спецтехники несанкционированная свалка.

Выводы

Таким образом, несмотря на то, что алгоритм Дейкстры является более опе-

ративным и строит более короткий маршрут между заданными точками по сравнению с авторским методом, использование последнего для составления маршрутов ликвидации стихийных несанкционированных свалок позволяет учитывать их экологическую опасность и составлять планы санитарной уборки города, основываясь на приоритетах природоохранной политики и обеспечения экологической безопасности населения.

Список литературы

1. Иорданов А.А., Гнездилова А.В. Государственное управление в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами // Молодежь и XXI век - 2017: материалы VII Международной молодежной научной конференции: в 4 т. Курск, 2017. С. 385-387.
2. Мартынова К.И., Иорданова А.В. Исследование загрязнения окружающей природной среды твердыми коммунальными отходами в Курской области // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Курск, 2019. С. 235-240.

3. Иорданова А.В. Исследование вклада междисциплинарных научных подходов в решение экологических проблем, связанных с утилизацией коммунальных отходов // Исторические, философские и методологические проблемы современной науки: сборник статей 2-й Международной научной конференции молодых ученых. Курск, 2019. С. 238-242.

4. Особенности процедуры оценки риска негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения / В.В. Юшин, В.М. Попов, И.О. Кирильчук, А.Ю. Коровина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. № 3 (28). С. 36-49.

5. Ключкова Е.Н. Обоснование выбора алгоритма поиска пути решения задач построения маршрута к месту назначения // Вестник Московского университета МВД России. 2015. №5. С. 205-209.

6. Sven Peyer, Dieter Rautenbach, Jens Vygen. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing // Journal of Discrete Algorithms. 2009. №7. P. 377-390.

7. Chowdhury M., Rahman M., Boutaba R. Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping // IEEE ACM Trans. Netw. 2012. Vol. 20(1). P. 206-219.

8. Pape U. Implementation and efficiency of moor-algorithms for the shortest route problem // Mathematical programming. 2012. 7. P. 212-222.

9. . Efficient algorithm for finding k shortest paths based on reoptimization technique / Bi Yu Chen, Xiao-Wei Chena, Hui-Ping Chen, William H.K. Lam // Transportation Research Part E. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554519305678>

10. Ладик А.С., Маслобоев А.В. Разработка автоматизированной информационной системы управления логистикой бытовых отходов (на примере г. Апатиты) // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19. № ½. С. 207-216.

11. Рамзаев В.М., Хаймович И.Н., Мартынов И.В. Методы поиска кратчайших путей на графах в организационно-экономических системах и их реализация // Информационные технологии и нанотехнологии: сборник V Международной конференции и молодёжной школы. Самара, 2019. С.1-8.

12. Оценка загрязнения городской среды с применением ГИС-технологий / В.М. Попов, Е.В. Меркулова, Н.А. Чепиков, И.О. Рыкунова // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство. Транспорт. 2008. № 2-18. С. 48-51.

13. Кирильчук И.О., Юшин В.В. Адаптированная система критериев типизации несанкционированных свалок // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 2 (23). С. 85-93.

14. Разработка элементов информационно-аналитической системы учета несанкционированных свалок / В.В. Юшин, В.М. Попов, И.О. Кирильчук, А.В. Гнездилова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8. № 3 (28). С. 68-80.

15. Юшин В.В., Кирильчук И.О. Геоинформационный учет и оценка опасности стихийных несанкционированных свалок // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 6 (198). С. 34-42.

16. Sabry A. H., Bacha A., Benhra J. A contribution to solving the traveling salesman problem using ant colony optimization and web mapping platforms Application to logistics in a urban context. in Codit'14, Metz, France, 2014.

17. Sabry A. H., Benhra J., Hicham E. H. Comparison of the performance of genetic algorithms and ant algorithms in relation to the traveling salesman problem // International Journal of Computer Applications. 2015. Vol.19. № 19.

18. Minji Choi, Seokho Chi. Optimal route selection model for fire evacuations based on hazard prediction data // Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 94. P. 321-333.

19. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера / С. С. Семенов, А. В. Педан, В. С. Воловиков, И. С. Климов // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116-131. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/08-Semenov.pdf>

20. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints // European Journal of Operational Research. 2012. Vol. 218. P. 1-6.

References

1. Iordanov A.A., Gnezdilova A.V. [Public administration in the field of solid municipal waste management]. *Molodezh' i XXI vek - 2017. Materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii. Molodezh' i XXI vek - 2017 materialy VII Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Youth and the XXI century-2017. Proceedings of the VII International Youth Scientific Conference]. Kursk, 2017, pp. 385-387 (In Russ.)

2. Martynova K.I., Iordanova A.V. [Investigation of environmental pollution by solid municipal waste in the Kursk region]. *Aktual'nye problemy ekologii i okhrany truda. Sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of ecology and labor protection: collection of articles of the XI International scientific and practical conference]. Kursk, 2019, pp. 235-240 (In Russ.).

3. Jordanova A.V. [Research of the contribution of interdisciplinary scientific approaches to solving environmental problems related to the disposal of municipal waste]. *Istoricheskie, filosofskie i metodologicheskie problemy sovremennoi nauki. Sbornik statei 2-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh* [Historical, philosophical and methodological problems of modern science. Collection of articles of the 2nd International scientific conference of young scientists]. Kursk, 2019, pp. 238-242 (In Russ.).

4. Yushin V.V., Popov V.M., Kiril'chuk I.O., Korovina A.Yu. Osobennosti protsedury otsenki riska negativnogo vozdeistviya ob"ektov razmeshcheniya otkhodov na okruzhayushchuyu sredyu i zdorov'e naseleniya [Features of the procedure for assessing the risk of negative impact of waste disposal facilities on the environment and public health]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2018, no. 3 (28), pp.36-49 (In Russ.).

5. Klochkova E. N. Obosnovanie vybora algoritma poiska puti resheniya zadach postroeniya marshruta k mestu naznacheniya [Justification of the choice of the algorithm for finding a way to solve the problems of building a route to the destination]. *Vestnik Moskovskogo universiteta MVD Rossii = Vestnik of Moscow University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2015, no. 5, pp.205-209 (In Russ.).

6. Sven Peyer, Dieter Rautenbach, Jens Vygen. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing. *Journal of Discrete Algorithms*, 2009, no.7, pp. 377-390.

7. Chowdhury M., Rahman M., Boutaba R. Vineyard: Virtual network embedding algorithms with coordinated node and link mapping. *IEEE ACM Trans. Netw*, 2012, no.20(1), pp. 206-219.

8. Pape U. Implementation and efficiency of moor-algorithms for the shortest route problem. *Mathematical programming*, 2012, 7, pp. 212-222.

9. Bi Yu Chen, Xiao-Wei Chena, Hui-Ping Chen, William H.K. Lam. Efficient algorithm for finding k shortest paths based on reoptimization technique. *Transportation Research Part E*. 2020. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554519305678>

10. Ladik A. S., Masloboev A.V. Razrabotka avtomatizirovannoi informatsionnoi sistemy upravleniya logistikoi bytovykh otkhodov (na primere g. Apatity) [Development of an automated information system for managing logistics of household waste (on the example of Apatity)]. *Vestnik MGTU = Vestnik of MSTU*, 2016, no. 19, 1: pp. 207-216. (In Russ.)

11. Ramzaev V. M., Khaimovich I. N., Martynov I. V. [Methods of searching for shortest paths on graphs in organizational and economic systems and their implementation]. *Sbornik V Mezhdunarodnoi konferentsii i molodezhnoi shkoly «Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii»* [Collection of the V International conference and youth school "Information technologies and nanotechnologies"]. Samara, 2019, pp. 1-8 (In Russ.)

12. Popov V.M., Merkulova E.V., Chepikov N.A., Rykunova I.O. Otsenka zagryazneniya gorodskoi sredy s primeneniem GIS-tekhnologii [Assessment of urban pollution using GIS technologies]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport = Proceedings of the Orel State Technical University. Series: Building. Stroitel'stvo. Transport*, 2008, no. 2-18, pp. 48-51 (In Russ.)

13. Kiril'chuk I.O., Yushin V.V. Adaptirovannaya sistema kriteriev tipizatsii nesanktsionirovannykh svalok [Adapted system of criteria for typing unauthorized dumps]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*, 2017, no. 2 (23), pp. 85-93 (In Russ.)

14. Yushin V.V., Popov V.M., Kiril'chuk I.O., Gnezdilova A.V. Razrabotka elementov informatsionno-analiticheskoi sistemy ucheta nesanktsionirovannykh svalok [Development of elements of an information and analytical system for recording unauthorized dumps]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computing Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 3 (28), pp. 68-80. (In Russ.)

15. Yushin V.V., Kiril'chuk I.O. Geoinformatsionnyi uchet i otsenka opasnosti stikhiiinykh nesanktsionirovannykh svalok [Geoinformation accounting and risk assessment of natural unauthorized dumps]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*, 2017, no. 6 (198), pp. 34-42. (In Russ.)

16. Sabry A. H., Bacha A., Benhra J. A contribution to solving the traveling salesman problem using ant colony optimization and web mapping platforms Application to logistics in a urban context. in Codit'14, Metz, France, 2014.

17. Sabry A. H., Benhra J., Hicham E. H. Comparison of the performance of genetic algorithms and ant algorithms in relation to the traveling salesman problem. *International Journal of Computer Applications*. 2015, 19.

18. Minji Choi, Seokho Chi. Optimal route selection model for fire evacuations based on hazard prediction data. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2019, no. 94, pp. 321-333.

19. Semenov S. S., Pedan A. V., Volovikov V. S., Klimov I. S. Analiz trudoemkosti razlichnykh algoritmicheskikh podkhodov dlya resheniya zadachi kommivoyazhera [Analysis of the complexity of various algorithmic approaches for solving the traveling salesman problem]. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti = Management Systems, communications and security*, 2017, no. 1, pp. 116-131. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2017-01/08-Semenov.pdf> (In Russ.)

20. Baldacci R., Mingozzi A., Roberti R. Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*. 2012, no. 218, pp. 1-6.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кирильчук Ираида Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: iraida585@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8636-9340>.
Researcher ID: N-8966-2016

Иорданова Анастасия Владимировна, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru

Юшин Василий Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой охраны труда и окружающей среды, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Попов Виктор Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры охраны труда и окружающей среды, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: otios@mail.ru

Iraida O. Kirilchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Labour and Environment Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: iraida585@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8636-9340>.
Researcher ID: N-8966-2016

Anastasia V. Iordanova, Post-Graduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7780-497X>

Vasily V. Yushin, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Labour and Environment Protection, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru

Victor M. Popov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Labour and Environment Protection, Honoured Worker of Higher Education of the Russian Federation, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: otios@mail.ru

