МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Известия

Юго-Западного государственного университета

Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение

Научный журнал

Том 11 № 1 / 2021

Proceedings

of the Southwest State University

Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

Scientific Journal

Vol. 11 № 1 / 2021

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie)

Научный рецензируемый журнал

Основан в 2011 г.

Цель издания – публичное представление научно-технической общественности научных результатов фундаментальных, проблемно-ориентированных научных исследований в таких областях, как информационные и интеллектуальные системы, мехатроника и робототехника, распознавание и обработка изображений, системный анализ и принятие решений, моделирование в медицинских и технических системах, приборы и методы контроля природной среды.

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:

Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки) – 05.11.01.

Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки) – 05.11.13.

Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки) – 05.11.17

Системы, сети и устройства телекоммуникаций (технические науки) – 05.12.13.

Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки) – 05.13.01.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Томакова Римма Александровна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р. М. Алгулиев, д-р техн. наук, профессор;
Ю. С. Бехтин, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Бурмака, д-р техн. наук, профессор;
В. Н. Гридин, д-р техн. наук, профессор;
А. Л. Жизняков, д-р техн. наук, профессор;
Ж. Т. Жусубалиев, д-р техн. наук, профессор;
С. А. Зинкин, д-р техн. наук, доцент;
Зо Зо Тун, канд. техн. наук, профессор;
И. В. Зотов, д-р техн. наук, профессор;
Н. А. Кореневский, д-р техн. наук, профессор;
Е. Н. Коровин, д-р техн. наук, профессор;
А. Н. Пылькин, д-р техн. наук, профессор;
Риад Таха Аль-Касасбех, д-р техн. наук, профессор;
В. Г. Рубанов, д-р техн. наук, профессор;
С. П. Серегин, д-р мед. наук, профессор;
А. С. Сизов, д-р техн. наук, профессор;
В. С. Титов, д-р техн.наук, профессор,
заслуженный деятель науки России;
С. А. Филист, д-р техн. наук, профессор;
А. В. Филонович, д-р техн. наук, профессор;
А. А. Ханова, д-р техн. наук, доцент

Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
Адрес учредителя, издателя и редакции:
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 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 №ФС77-44620 от 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

Сайт журнала: https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/

© Юго-Западный государственный университет, 2021

Материалы журнала доступны
под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

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

16+

Подписка и распространение:
журнал распространяется
по подписке.
Подписной индекс журнала 44288
в объединенном каталоге
«Пресса России».

Периодичность: четыре раза в год

Свободная цена.

Оригинал-макет подготовлен О. В. Кофановой

Подписано в печать 30.03.2021. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,3.
Тираж 1000 экз. Заказ 8.

Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering

Peer-reviewed scientific journal
Published since 2011

These Proceedings present the results of scientific fundamental and applied research in such areas as information and intelligent systems; mechatronics, robotics; image recognition and processing; system analysis and decision making; simulation in medical and technical systems; devices and methods for monitoring the natural environment.

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 doctorial or candidate thesis in the following areas:

Devices and methods of measurement (by type of measurement) (technical Sciences) – 05.11.01.

Devices and methods of control of the natural environment, substances, materials and products (technical Sciences) – 05.11.13.

Devices, systems and medical devices (technical Sciences) – 05.11.17.

Telecommunication systems, networks and devices (technical Sciences) – 05.12.13.

System analysis, management and information processing (by industry) (technical Sciences) – 05.13.01.

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

Rimma A. V. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor,
Southwest State University (Kursk, Russia)

EDITORIAL BOARD

R. M. Alguliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Y. S. Bekhtin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. A. Burmaka, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University (Kursk, Russia);
V. N. Gridin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. L. Zhiznyakov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Zh. T. Zhusubaliyev, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. A. Zinkin, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor;
Zo Zo Thun, Candidate of Engineering, Professor;
I. V. Zotov, Dr. of Sci. (Engineering);
N. A. Korenevsky, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
E. N. Korovin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. N. Pylkin, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
Riad Taha Al-Kasasbeh, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
V. G. Rubanov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. P. Seryogin, Doctor of Sci. (Medical), Professor;
A. S. Sizov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
V. S. Titov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
S. A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. V. Filonovich, Dr. of Sci. (Engineering), Professor;
A. A. Khanova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor

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: (+74712) 22-25-26,
Fax: (+74712) 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
(PI №FS77-44620 of 15.04.2011).

ISSN 2223-1536 (Print)

Web-site: https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/

© Southwest State University, 2021

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

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 44288
in the General Catalogue "Pressa Rossii"

Frequency: Quarterly

Free price

Original lay-out design: O. V. Kofanova

Signed for printing 30.03.2021. Format 60x84/8.
Offset paper. Printer's sheets: 18,3.
Circulation 1000 copies. Order 8.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....8

Оригинальные статьи

Использование информационных технологий для моделирования в широком интервале температур зависимости вязкости жидкости от температуры с определенной заданной относительной погрешностью 8

Малай Н. В., Пономарев О. П., Малай И. Н.

МЕХАТРОНИКА, РОБОТОТЕХНИКА.....21

Оригинальные статьи

Исследование параметров и улучшение МРТ совместимого составного магнита для кохлеарной имплантации.....21

Егоров А. И., Глуховский Е. М., Ткачук Г. Н.

О применении резонансного контура для оценки наличия пор в структуре компаунда.....36

Четвериков Д. А., Гостенков Е. В.

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ.....50

Оригинальные статьи

Программное обеспечение, предназначенное для оцифровки переходной характеристики, при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте.....50

Томакова Р. А., Брежнев А. В., Корсунский Н. А., Егоров И. С.

Цифровая интеграция людей с ограниченными возможностями.....68

Кузнецова А. С., Гилка В. В., Качанов Ю. А., Чумаков А. В., Окороджи Дюк Филип Чике

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.....82

Оригинальные статьи

Совершенствование методов оценки негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения.....82

Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Филист С. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....98

Оригинальные статьи

Нечеткие модели дифференциальной диагностики пиелонефрита у беременных.....98

Серегин С. П., Родионов Д. С., Холименко И. М., Лазурина Л. П.

Разработка модели определения угла Кобба и метода оценки кривизны позвоночника в сагиттальной и фронтальной плоскостях на базе системы захвата движения Antilatency 112

Донская А. Р., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л., Зыков Д. С.

Математические модели прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы у работников, контактирующих с промышленными ядохимикатами.....129

Родионова С. Н., Аксёнов В. В., Медников Д. А., Сафронов Р. И.

Моделирование беспроводной передачи данных для перемещаемых объектов приема-передачи.....144

Борзов Д. Б., Кошелев М. А.

К сведению авторов.....157

CONTENT

INFORMATION AND INTELLIGENT SYSTEMS **8**

Original articles

Use of Information Technologies for Modeling the Dependence of Liquid Viscosity on Temperature in a Wide Temperature Range with a Certain Specified Relative Error 9

Malay N. V., Ponomarev O. P., Malay I. N.

MECHATRONICS, ROBOTICS **21**

Original articles

Investigation of Parameters and Improvement of MRI Compatible Composite Magnet for Cochlear Implantation 22

Glukhovskiy E. M., Egorov A. I., Tkachuk G. N.

On the Application of a Resonance Circuit to Assess the Presence of Pores in the Structure of the Compound 37

Chetverikov D. A., Gostenkov E. V.

IMAGE RECOGNITION AND PROCESSING **50**

Original articles

Software Designed to Digitize the Transition Characteristic when Conducting Bioimpedance Studies on a Biological Object 51

Tomakova R. A., Brezhnev A. V., Korsunsky N. A., Egorov I. S.

Digital Integration of People with Disabilities 69

Kuznetsova A S., Gilka V. V., Kachanov Y. A., Chumakov A. V., Okoroji Duke Philip Chike

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING **82**

Original articles

Improving Methods for Assessing the Negative Impact of Waste Disposal Facilities on the Environment and Public Health 83

Kirilchuk I. O., Iordanova A. V., Filist S. A.

MODELING IN MEDICAL AND TECHNICAL SYSTEMS **98**

Original articles

Fuzzy Models of Differential Diagnosis of Pyelonephritis in Pregnant Women 99

Seregin S. P., Rodionov D. S., Kholimenko I. M., Lazurina L. P.

Development of a Model for determining the Cobb Angle and a Method for Estimating the Curvature of the Spine in the Sagittal and Frontal Planes Based on the Motion Capture System Antilatency 113

Donskaya A. R., Orlova Y. A., Rosaliev V. L., Zykov D. S.

Mathematical Models for Predicting and Early Diagnosis of Bronchial Asthma in Workers Exposed to Industrial Pesticides 130

Rodionova S. N., Aksenov V. V., Mednikov D. A., Safronov R. I.

Simulation of Wireless Data Transmission with the Ability to Move the Receiving-Transmitting Object 145

Borzov D. B., Koshelev M. A.

Information for Authors **157**

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942, 004.021, 004.432

Использование информационных технологий для моделирования в широком интервале температур зависимости вязкости жидкости от температуры с определенной заданной относительной погрешностью

Н. В. Малай[1], О. П. Пономарев[2], И. Н. Малай[3] ✉

[1] Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы 85, г. Белгород 308015, Российская Федерация

[2] Белгородский университет кооперации, экономики и права
ул. Садовая 116а, г. Белгород 308023, Российская Федерация

[3] Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ул. Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: john.n.mcfly@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в создании математической модели, позволяющей рассчитывать в широком интервале температур зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры с необходимой относительной погрешностью*

Методы. *В качестве базовых методов использовался метод нелинейного поиска и наименьших квадратов. В процессе исследования зависимости вязкости жидкости от температуры была создана математическая модель, реализованная в виде полуэмпирической формулы, которая представляет собой экспоненциально-степенной вид зависимости вязкости жидкости от температуры. Анализ структуры математической модели показал, что полученная модель является нелинейной. Применения только алгоритмов нелинейного поиска не гарантирует однозначного решения задачи, что связано с возможным наличием нескольких локальных экстремумов математической модели, т. е. различной ее чувствительности к изменению отдельных искомых параметров модели. Метод наименьших квадратов, который обычно применяется для решения линейных математических моделей, не имеет недостатков методов нелинейного поиска. Поэтому для решения поставленной задачи использовался смешанный метод, сочетающий нелинейный поиск и метод наименьших квадратов.*

© Малай Н. В., Пономарев О. П., Малай И. Н., 2021

Результаты. *В ходе исследования математической модели, реализованной в виде полуэмпирической формулы, был разработан обобщенный алгоритм решения задачи, сочетающий нелинейный поиск и метод наименьших квадратов. Программа на языке С++, созданная по разработанному алгоритму, показала приемлемую эффективность – достаточно высокое быстродействие и устойчивость решения. В качестве целевой функции для идентификации использовалась сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от модельных. Результаты численных расчетов показали, что относительная погрешность получаемых моделей зависит от моделируемой жидкости. Так для воды, где зависимость вязкости от температуры близка к линейной, отклонения модельных значений от экспериментальных не превышают двух процентов. Численное моделирование также показало, что чем выше нелинейность зависимости вязкости от температуры (например, для глицерина), тем больше будут отклонения некоторых модельных значений от экспериментальных. В таких случаях качество модели можно повысить, разделив экспериментальные данные на два и более температурных отрезка. В этом случае имеется несколько математических моделей, обладающих для своего температурного интервала более высокой точностью моделирования.*

Заключение. *Проведенные исследования показали, что представленная математическая модель позволяет рассчитывать изменение коэффициента вязкости жидкости в широком интервале температур с определенной заданной наперед необходимой относительной погрешностью.*

Ключевые слова: *вязкость жидкости; математическое моделирование процессов вязкости жидкости; метод наименьших квадратов; погрешность метода; оценка качества модели.*

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

Финансирование: *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90063.*

Для цитирования: Малай Н. В., Пономарев О. П., Малай И. Н. Использование информационных технологий для моделирования в широком интервале температур зависимости вязкости жидкости от температуры с определенной заданной относительной погрешностью // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 8–20.

Поступила в редакцию 18.12.2020 *Подписана в печать 30.01.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Use of Information Technologies for Modeling the Dependence of Liquid Viscosity on Temperature in a Wide Temperature Range with a Certain Specified Relative Error

Nikolay V. Malay[1] , Oleg P. Ponomarev[2], Ivan N. Malay[3] ✉

[1] Belgorod National Research University
85 Pobeda str., Belgorod 308025, Russian Federation

[2] Belgorod University of Cooperation, Economy and Law
116a Sadovaya str., Belgorod 308023, Russian Federation

[3] Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: malay@.bsu.edu.ru

Abstract

The purpose of research *is to create a mathematical model that allows us to calculate the dependence of the viscosity coefficient of a liquid on the temperature over a wide temperature range with the necessary relative error.*

Methods. *The method of nonlinear search and least squares was used as the basic methods. In the process of studying the dependence of liquid viscosity on temperature, a mathematical model was created, implemented in the form of a semi-empirical formula, which is an exponential-power form of the dependence of liquid viscosity on temperature. Analysis of the structure of the mathematical model showed that the resulting model is nonlinear. The use of only nonlinear search algorithms does not guarantee an unambiguous solution of the problem, which is due to the possible presence of several local extremes of the mathematical model, i.e. its different sensitivity to changes in individual desired model parameters. The least squares method, which is usually used to solve linear mathematical models, does not have the disadvantages of non-linear search methods. In this case, there are several mathematical models that have a higher simulation accuracy for their temperature range.*

Results*. In the course of studying the mathematical model implemented in the form of a semi-empirical formula, a generalized algorithm for solving the problem was developed, combining nonlinear search and the method of least squares. The program in C++, created according to the developed algorithm, showed acceptable efficiency – a fairly high speed and stability of the solution. The sum of squared deviations of the experimental values from the model values was used as an objective function for identification. The results of numerical calculations showed that the relative error of the obtained models depends on the simulated fluid. So for water, where the dependence of viscosity on temperature is close to linear, the deviations of the model values from the experimental ones do not exceed two percent. Numerical simulations also showed that the higher the nonlinearity of the viscosity-temperature dependence (for example, for glycerol), the greater the deviations of some model values from the experimental ones. In such cases, the quality of the model can be improved by dividing the experimental data into two or more temperature segments. In this case, there are several mathematical models, each for its own temperature range, with higher modeling accuracy.*

Conclusion*. The conducted studies have shown that the presented mathematical model allows us to calculate the change in the viscosity coefficient of a liquid in a wide temperature range with a certain required relative error set in advance.*

Keywords: *fluid viscosity; mathematical modeling of fluid viscosity processes; least squares method; method error; model quality assessment.*

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

Funding: *The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90063.*

For citation: Malay N. V., Ponomarev O. P., Malay I. N. Use of Information Technologies for Modeling the Dependence of Liquid Viscosity on Temperature in a Wide Temperature Range with a Certain Specified Relative Error. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 8–20. (In Russ.)

Received 18.12.2020 *Accepted 30.01.2021* *Published 30.03.2021*

***

Введение

Информационные технологии играют важнейшую роль в современном мире [1; 2]. Занимая уникальное положение в обществе, они не просто оказывают влияние на его социальные, общественные и экономические институты, но и являются также двигателем глобального экономического роста. Они проникают практически во все сферы деятельности человечества.

Информационные технологии широко применяются в управлении технологических процессов [3; 4; 5; 6], в частности процессов, связанных с жидкостью, которые используются в них в качестве рабочего тела, например, в гидроприводах, растворах, лекарственных препаратов, а также как охлаждающие, разделительные или противообледенительные агенты и т. д.

Одна из основных величин, которая характеризует важнейшее для техники свойство жидкости, – это вязкость [7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14]. Из всех параметров жидкости только вязкость сильно зависит от температуры. Именно вязкость оказывает сопротивление перемещению одного ее слоя жидкости относительно другого. Кроме того, при расчете процессов, связанных с седиментацией, теплообменом, с транспортированием жидкости, фильтрацией и многими другими технологическими операциями, необходимо знать эту физико-химическую величину. Трудно также переоценить роль вязкости в природе, в решении экологических проблем и т. д.

Другой важной особенностью этой физико-химической величины является то, что она входит в систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, которая в научной литературе называется системой уравнений Навье-Стокса [14]. Эта система уравнений является одной из важнейших систем в гидро- и газовой динамике и применяется при математическом моделировании многих как прикладных задач, так и природных явлений [15; 16; 17; 18; 19].

Следует отметить, что в отличие от твердого и газообразного агрегатных состояний, которые достаточно хорошо изучены (их теории основываются на методах статистической механики и термодинамики), жидкое же агрегатное состояние исследовано недостаточно. Отсутствие общей теории жидкого состояния не дает возможность разработать точные, теоретически обоснованные методы расчета вязкости жидкостей. Поэтому в литературе имеются полуэмпирические формулы, связанные с разными теориями структуры жидкой фазы, позволяющие определять значение вязкости различных жидкостей. Однако точность этих полуэмпирических формул невысокая [10].

С учетом вышесказанного при практических расчетах к выбору значения этого параметра (коэффициента вязкости) следует подходить очень осторожно. Кроме того, в технологических процессах, связанных с жидкостями, необходимо знать не только конкретное значение этого параметра, но и как он изменяется в заданном интервале температур. Как правило, экспериментальных данных часто бывает недостаточно или их просто не существует. В решении

этого вопроса могут помочь современные информационные технологии.

Материалы и методы

В процессе исследования зависимости вязкости жидкости от температуры была создана математическая модель, реализованная в виде полуэмпирической формулы, которая представляет собой экспоненциально-степенной вид зависимости вязкости жидкости от температуры (1):

$$\mu(t) = \mu_\infty \times [f_0 + \sum_{n=1}^{N} f_n \left(\frac{t}{t_\infty} - 1\right)^n] \cdot e^{-a\cdot\left(\frac{t}{t_\infty}-1\right)}, \quad (1)$$

где μ_∞ – вязкость жидкости при заданной температуре t_∞ (°C); μ – вязкость жидкости при температуре t; a, f_0, f_n $(n = \overline{1, N})$ – параметры модели.

При $f_n = 0$ $(n \geq 0)$ формула (1) переходит в формулу Рейнольдса, которая дает относительную погрешность до 30 процентов [10].

Проведенные исследования формулы (1) показали, что она позволяет рассчитывать изменение коэффициента вязкости в широком интервале температур с определенной наперед заданной относительной погрешностью.

Для практического использования модели (1) ее требуется идентифицировать. В соответствии с ГОСТ идентификация модели подразумевает определение структуры и параметров математической модели, обеспечивающей наилучшее совпадение выходных координат объекта и модели при одинаковых входных воздействиях.

Структура рассматриваемой модели задана уравнением (1). Таким образом, задачей идентификации является вычисление коэффициентов a и f_n по табличным (экспериментальным) данным. Предполагается, что экспериментальные данные для конкретной жидкости содержатся в таблице из двух столбцов: t_i и $\mu_i^э$, $(i = \overline{1, k})$. Количество измерений k в таблице должно превышать верхнюю границу суммы N в модели (1): $k > N+1$.

В качестве целевой функции для идентификации используется сумма квадратов отклонений экспериментальных значений $\mu_i^э$ от модельных $\mu_i^м$:

$$Q(a, f_n) = \sum_{i=1}^{k} \left(\mu_i^э - \mu_i^м(a, f_n)\right)^2. \quad (2)$$

Таким образом, задача идентификации заключается в поиске таких значений коэффициентов a и f_n модели (1), при которых целевая функция (2) принимает минимальное значение.

Анализ структуры показывает, что модель (1) является нелинейной. Это требует для ее идентификации применения алгоритмов нелинейного поиска, например метода наискорейшего спуска. Однако такие алгоритмы не гарантируют однозначного решения задачи, что связано с возможным наличием нескольких локальных экстремумов функции (2)

или с ее «овражностью», т. е. с различной чувствительностью Q к изменению отдельных искомых параметров a и f_n.

Для идентификации линейных математических моделей при критерии (2) обычно используется метод наименьших квадратов, который не имеет недостатков методов нелинейного поиска. Поэтому одна из подзадач, решаемых в работе, заключается в линеаризации нелинейной модели.

Если считать параметр a модели (1) известным, то можно привести модель к линейному виду:

$$y(x) = f_0 + \sum_{n=1}^{N} f_n \cdot x^n, \qquad (3)$$

где $y(x) = \frac{\mu(t)}{\mu_\infty} \cdot e^{a \cdot x}$; $x = \frac{t}{t_\infty} - 1$.

Поэтому для решения задачи использовался смешанный метод, сочетающий нелинейный поиск (коэффициента a) и метод наименьших квадратов (для f_n) [20; 21; 22]. Обобщенный алгоритм решения показан на рисунке 1: где $T^э$, $M^э$ – табличные (экспериментальные) значения температуры и вязкости;

h – шаг изменения коэффициента a;

h_0, $h_{\min}$ – соответственно начальное и минимальное значения шага h;

F – массив коэффициентов f_n.

Рис. 1. Алгоритм идентификации модели

Fig. 1. Model identification algorithm

При вводе данных (блок 2) величина a имеет смысл начальной точки поиска оптимального значения a. Основная идея алгоритма заключается в выполнении цикла «пока» с постусловием (блоки 4; 5; 6; 7), решающим три подзадачи: определение текущего шага h и нового значения a (блок 4); линеаризацию модели (1) при фиксированном a и вычисление массива коэффициентов F методом наименьших квадратов (блок 5); вычисление критерия Q по формуле (2), запоминание минимального значения Q и соответствующих ему значений a и F (блок 6). Цикл прекращается, когда модуль шага h становится меньше $h_{\min}$. Следует заметить, что шаг h может менять свой знак. Это позволяет искать оптимальное значение a в обе стороны (увеличения или уменьшения).

Результаты и их обсуждение

Программа на языке C++, созданная по разработанному алгоритму, показала приемлемую эффективность – достаточно высокое быстродействие и устойчивость решения. Устойчивость следует понимать как однозначность решения при различных начальных значениях a. Определенная новизна в использованном алгоритме решения заключается в сочетании нелинейного поиска и метода наименьших квадратов. При этом удалось избежать недостатков использования только методов нелинейного поиска: нелинейный поиск выполняется всего для одного параметра a. По модели (1) видно, что a задает форму экспоненты. Массив F влияет на образование локальных минимумов критерия (2) и является составной частью степенного алгебраического многочлена. Степенной многочлен линеаризуется по формуле (3). В результате с получением вектора параметров F успешно справляется метод наименьших квадратов.

Что касается адекватности получаемых моделей, то многое зависит от моделируемой жидкости. Так для воды, где зависимость вязкости от температуры близка к линейной, отклонения модельных значений от экспериментальных не превышают 2% [10]. Моделирование показало, что чем выше нелинейность зависимости вязкости от температуры (например, для глицерина), тем больше будут отклонения некоторых модельных значений от экспериментальных. В таких случаях качество модели можно повысить, разделив экспериментальные данные на два и более температурных отрезка. Тогда будут получены несколько математических моделей, обладающих для своего температурного интервала более высокой точностью моделирования.

Для примера рассмотрим моделирование вязкости глицерина. В таблице 1 приведены результаты моделирования вязкости для диапазона температур от 10°C до 200°C [10]. Математическая модель (для N = 4) в этом случае имеет вид

$$\mu(t) = 600[10{,}95 - 65{,}1x + 149{,}1x^2 - - 90{,}04x^3 - 2{,}156x^4]e^{-14{,}94x}, \quad (4)$$

где $x = \frac{t}{303} - 1$.

Из таблицы 1 видно, что относительная погрешность модели (4) достаточно высока.

Разделим температурный диапазон для идентификации модели на две части: 10–70°С и 80–200°С. Получим две модели:

$$\mu_1(t) = 600[18{,}5 - 230{,}1x + 1397{,}7x^2 - - 2588x^3 - 4{,}003x^4]e^{-19{,}09x} \quad (5)$$

и

$$\mu_2(t) = 35[50{,}75 - 259{,}4x_2 + + 492{,}8{x_2}^2 - 317{,}1{x_2}^3 + +0{,}0245{x_2}^4]e^{-11{,}51x_2}. \quad (6)$$

Здесь $x_2 = \frac{t}{353} - 1$.

Результаты моделирования вязкости глицерина по моделям (5) и (6) показаны в таблицах 2 и 3.

Таблица 1. Оценка работы модели (4)

Table 1. Evaluation of the model (4)

t, °C	$\mu^э$	$\mu^м$	Погрешность, %
10	3950	3283,081	16,9
20	1480	1628,142	10,0
30	600	803,236	33,9
40	330	396,071	20,0
50	180	196,759	9,3
60	102	99,668	2,3
70	59	52,289	11,4
80	35	28,869	17,5
90	21	16,946	19,3
100	13	10,569	18,7
120	5,2	4,691	9,8
140	1,8	2,239	24,4
160	1	1,060	6,0
180	0,45	0,481	6,9
200	0,22	0,207	5,9

Таблица 2. Оценка работы модели (5)

Table 2. Evaluation of the model (5)

t, °C	$\mu^э$	$\mu^м$	Погрешность, %
10	3950	3941,706	0,2
20	1480	1473,467	0,4
30	600	626,212	4,4
40	330	315,183	4,5
50	180	178,943	0,6
60	102	104,656	2,6
70	59	58,484	0,9

Таблица 3. Оценка работы модели (6)

Table 3. Evaluation of the model (6)

t, °C	μэ	μм	Погрешность, %
80	35	35,012	0,0
90	21	21,197	0,9
100	13	12,898	0,8
120	5,2	4,940	5,0
140	1,8	2,043	13,5
160	1	0,928	7,2
180	0,45	0,452	0,4
200	0,22	0,222	0,7

Из таблиц 2 и 3 видно, что погрешность моделирования вязкости глицерина существенно уменьшилась.

Выводы

Проведенные исследования показали, что формула (1) позволяет рассчитывать изменение коэффициента вязкости жидкости в широком интервале температур с определенной наперед заданной относительной погрешностью. Программа на языке C++, созданная по разработанному алгоритму, показала приемлемую эффективность – достаточно высокое быстродействие и устойчивость решения. Новизна в использованном алгоритме при решении задачи заключается в сочетании нелинейного поиска и метода наименьших квадратов. Такое сочетание обусловлено тем, что предложенная математическая модель нелинейная.

Список литературы

1. Информационные технологии и вычислительные системы: Обработка информации и анализ данных. Программная инженерия. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики / под ред. С. В. Емельянова. М.: Ленанд, 2015. 104 с.

2. Мертенс П. Интегрированная обработка информации. Операционные системы в промышленности. М.: Финансы и статистика, 2007. 424 с.

3. Лымарева О. А., Щеголева И. В. Информационные технологии как средство повышения эффективности управления современным предприятием // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2013. № 12. С. 3.

4. Горин Е. А. Информационные технологии и инновационное развитие промышленности // Инновации. 2005. № 7(84). С. 67–68.

5. Башкиров В. Е., Лазуко А. Г., Гордеева О. А. IT – как способ повышения эффективности управления бизнес-процессами в экономической сфере организаций // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2013. № 12. С. 92–94.

6. Вилков А. С., Вилков С. Л., Тараскин М. М. Информационные технологии в телекоммуникационных системах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 4(180). С. 57–62.

7. К вопросу о температурной и барической зависимости динамической вязкости н-алканов / А. Е. Жирнов, Г. М. Луковкин, М. С. Аржаков, С. А. Аржаков // Вестник Московского университета. Сер. 2, Химия. 2013. Т. 54, № 2. С. 121–126.

8. Болдырев Д. В., Ануфриев С. Д. Аппроксимация температурной зависимости вязкости жидкости // Инновационная наука. 2015. № 11. С. 18–21.

9. Колодежнов В. Н., Колтаков А. В. Анализ процесса теплопереноса для безнапорного, установившегося течения жидкости в плоском канале с учетом диссипации механической энергии и зависимости вязкости от температуры // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39, № 2. С. 297–303.

10. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. Л.: Химия, 1966. 535 с.

11. Фогельсон Р. Л., Лихачев Е. Р. Температурная зависимость вязкости // Журнал технической физики. 2001. Т. 71, вып. 8. С. 128–131.

12. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 630 с.

13. Борзенко Е. И., Шрагер Г. Р. Влияние вязкой диссипации на температуру, вязкость и характеристики течения при заполнении канала // Теплофизика и аэродинамика. 2014. Т. 21, № 2. С. 221–231.

14. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2003. Т. 6. 731 с.

15. Vertical transport of anthropogenic soot aerosol into the middle atmosphere / R. L. Pueshel, S. Verma, M. Rohatschek, G. V. Ferry, N. Boiadjieva, S. D. Hovard, A. W. Strawa // J. Geophys. Res. D. 2000. Vol. 105, no. 3. P. 3727–3736.

16. Effekt of thermal stress slip on microparticle photophoresis in gaseous media / Chyi-Yeou Soong, Wen-Ken Li, Chung-Ho, Pei-Yuan Tzeng // Optics Letters. 2010. Vol. 35, no. 5. P. 625–627.

17. Малай Н. В., Щукин Е. Р., Лиманская А. В. Решение краевой задачи для стационарной системы уравнений вязкой неизотермической жидкости // Известия высших учебных заведений. Математика. 2018. № 4. С. 60–69.

18. Malai N. V., Glushak A. V., Shchukin E. R. Solution of a boundary value problem for velocity linearized Navier-Stokes equations in the case of a heated spherical solid particle settling in fluid // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2018. Vol. 58, no. 7. P. 1132–1141.

19. Malay N. V., Shchukin E. R. Thermophoresis of heated moderately large spherical aerosol particles // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. Vol. 60, no. 3. P. 517–525.

20. Хартон А. Visual C++. Полный курс. М.: Издательский дом «И. Д. Вильямс», 2011. 1216 с.

21. Бьярне С. Программирование: принципы и практика с использованием C++. М.: Издательский дом «И. Д. Вильямс», 2016. 1328 с.

22. Медведев Д. И. Особенности объектно ориентированного программирования на C++/CLI, C# и Java. Казань: РИЦ «Школа», 2010. 444 с.

References

1. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy: Obrabotka informa-tsii i analiz dannykh. Programmnaya inzheneriya. Matematicheskoe modelirovanie. Pri-kladnye aspekty informatiki [Information technologies and computing systems: Information processing and data analysis. Software engineering. Mathematical modeling. Applied aspects of computer science]; ed. by S. V. Emelyanov. Moscow, Lenand Publ., 2015. 104 p.

2. Mertens P. Integrirovannaya obrabotka informatsii. Operatsionnye sistemy v promyshlennosti [Integrated information processing. Operating systems in industry]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2007. 424 p.

3. Lymareva O. A., Shchegoleva I. V. Informatsionnye tekhnologii kak sredstvo povysheniya effektivnosti upravleniya sovremennym predpriyatiem [Information technologies as a means of improving the efficiency of modern enterprise management]. *Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologii = Economics and Management of Innovative Technologies*, 2013, no. 12, p. 3.

4. Gorin E. A. Informatsionnye tekhnologii i innovatsionnoe razvitie promyshlennosti [Information technologies and innovative development of industry]. *Innovatsii = Innovation*, 2005, no. 7 (84), pp. 67–68.

5. Bashkirov V. E., Lazuko A. G., Gordeeva O. A. IT – kak sposob povysheniya effektivnosti upravleniya biznes-protsessami v ekonomicheskoi sfere organizatsii [IT – as a way to improve the efficiency of business process management in the economic sphere of organizations]. *Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologii = Economics and Management of Innovative Technologies*, 2013, no. 12, pp. 92–94.

6. Vilkov A. S., Vilkov S. L., Taraskin M. M. Informatsionnye tekhnologii v telekommunikatsionnykh sistemakh [Information technologies in telecommunications systems]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvods*tve = *Information Technologies in Design and Production*, 2020, no. 4 (180), pp. 57–62.

7. Zhirnov A. E., Lukovkin G. M., Arzhakov M. S., Arzhakov S. A. K voprosu o temperaturnoi i baricheskoi zavisimosti dinamicheskoi vyazkosti n-alkanov [On the question of the temperature and baric dependence of the dynamic viscosity of n-alkanes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 2, Khimiya = Bulletin of the Moscow University. Ser. 2, Chemistry*, 2013, vol. 54, no. 2, pp. 121–126.

8. Boldyrev D. V., Anufriev S. D. Approksimatsiya temperaturnoi zavisimosti vyazkosti zhidkosti [Approximation of the temperature dependence of liquid viscosity]. *Innovatsionnaya nauka = Innovative Science*, 2015, no. 11, pp. 18–21.

9. Kolodezhnov V. N., Koltakov A.V. Analiz protsessa teploperenosa dlya beznapornogo, ustanovivshegosya techeniya zhidkosti v ploskom kanale s uchetom dissipatsii mekhanicheskoi energii i zavisimosti vyazkosti ot temperatury [Analysis of the heat transfer process for a non-pressurized, steady-state fluid flow in a flat channel, taking into account the dissipation of mechanical energy and the dependence of viscosity on temperature]. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature Thermophysics*, 2001, vol. 39, no. 2, pp. 297–303.

10. Bretschneider C. Svoistva gazov i zhidkostei. Inzhenernye metody rascheta [With Properties of gases and liquids. Engineering methods of calculation]. Leningrad, Chemistry Publ., 1966. 535 p.

11. Vogelson R. L., Likhachev E. R. Temperaturnaya zavisimost' vyazkosti [Temperature dependence of viscosity]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 2001, vol. 71, is. 8, pp. 128–131.

12. Happel J., Brenner G. Gidrodinamika pri malykh chislakh Reinol'dsa [Hydrodynamics at small Reynolds numbers]. Moscow, Mir Publ., 1976. 630 p.

13. Borzenko E. I., Shrager G. R. Vliyanie vyazkoi dissipatsii na temperaturu, vyazkost' i kharakteristiki techeniya pri zapolnenii kanala [Influence of viscous dissipation on temperature, viscosity, and flow characteristics during channel fillin]. *Teplofizika i aerodinamika = Thermal Physics and Aerodynamics*, 2014, vol. 21. no. 2, pp. 221–231.

14. Landau L. D., Lifshits E. M. Gidrodinamika [Hydrodynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, vol. 6. 731 p.

15. Pueshel R. L., Verma S., Rohatschek M., Ferry G. V., Boiadjieva N., Hovard S. D. Strawa A. W. Vertical transport of anthropogenic soot aerosol into the middle atmosphere. *J. Geophys. Res. D.,* 2000, vol. 105, no. 3, pp. 3727–3736.

16. Chyi-Yeou Soong, Wen-Ken Li, Chung-Ho, Pei-Yuan Tzeng. Effekt of thermal stress slip on microparticle photophoresis in gaseous media. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 625–627.

17. Malay N. V., Shchukin E. R., Limanskaya A.V. Reshenie kraevoi zadachi dlya statsionarnoi sistemy uravnenii vyazkoi neizotermicheskoi zhidkosti [Solution of a boundary value problem for a stationary system of equations of a viscous nonisothermal liquid]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Matematika = Proceedings of Higher Educational Institutions. Mathematics*, 2018, no. 4, pp. 60–69.

18. Malai N. V., Glushak A. V., Shchukin E. R. Solution of a boundary value problem for velocity linearized Navier-Stokes equations in the case of a heated spherical solid particle

settling in fluid. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2018, vol. 58, no. 7, pp. 1132–1141.

19. Malay N. V., Shchukin E. R. Thermophoresis of heated moderately large spherical aerosol particles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 3, pp. 517–525.

20. Horton A. Visual C++. Polnyi kurs [Visual C++. A complete course]. Moscow: Publishing House "I. D. Williams", 2011. 1216 p.

21. Bjarne S. Programmirovanie: printsipy i praktika s ispol'zovaniem S++ [Programming: Principles and practice using C++]. Moscow, Publishing House "I. D. Williams", 2016. 1328 p.

22. Medvedev D. I. Osobennosti ob"ektnoorientirovannogo programmirovaniya na S++/CLI, C# i Java [Features of objectoriented programming in C++ / CLI, C# and Java]. Kazan, Shkola Publ., 2010. 444 p.

Информация об авторах / Information about the Authors

Малай Николай Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и математической физики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: malay@.bsu.edu.ru

Nikolay V. Malay, Dr. of Sci. (Physico-mathematical), Professor of the Department of Theoretical and Mathematical Physics, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: malay@.bsu.edu.ru

Пономарев Олег Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и технологии защиты информации, Белгородский университет кооперации, экономики и права, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: mpo48@mail.ru

Oleg P. Ponomarev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Organization and Technology of Information Protection, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Belgorod, Russian Federation, e-mail: mpo48@mail.ru

Малай Иван Николаевич, магистрант кафедры информационных технологий, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: john.n.mcfly@yandex.ru

Ivan N. Malay, Undergraduate of the Department of Information Technology, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: john.n.mcfly@yandex.ru)

Оригинальная статья / Original article

УДК 616.28-76:534.773.2

Исследование параметров и улучшение МРТ совместимого составного магнита для кохлеарной имплантации

А. И. Егоров[1], Е. М. Глуховский[1] ✉, Г. Н. Ткачук[1]

[1] Московский физико-технический институт
Институтский пер. 9, г. Долгопрудный 141701, Московская область, Российская Федерация

✉ e-mail: glukh.al@myrambler.ru

Резюме

Цель исследования *– проанализировать и сопоставить конструкции и полезные параметры моделей, используемых в системах кохлеарной имплантации, с целью выбора оптимальной конструкции.*
Методы. *В статье описана работа, проведенная при совершенствовании полезных моделей RU 198574, RU 196686, RU 2727227 и создании внешнего составного магнита. Авторы проанализировали составные магниты с различным количеством магнитных элементов (q = 4, 6, 8, 10 шт.), а также реализацию внутреннего магнита с заполнением пустого пространства феррофлюидом и без него.*
Результаты. *Авторы предоставляют модель измененной конструкция корпуса имплантируемой части составного магнита. Также был разработан ответный составной внешний магнит, который имеет цилиндрический корпус с посадочными местами под цилиндрические магниты, расположенные по окружности, что предотвращает угловые повороты составных магнитов относительно друг друга и позволяет учитывать при разработке электрической части взаимное расположение подводящих и отводящих проводов к приемной и передающей антеннам. Авторами приведены результаты моделирования магнитного поля составных магнитов с различными размерами корпусов и магнитных элементов. Приведены схемы распределения магнитного поля при взаимодействии обоих составных магнитов и рассчитаны силы, с которой внешняя часть притягивается к имплантируемой, также приведена формула для расчета максимальной силы притяжения составных магнитов, обусловленная давлением крови в капиллярах.*
Заключение. *Вопрос потери слуха требует постоянного детального изучения, а системы, используемые для коррекции патологии, – постоянного усовершенствования. Приведенные данные позволили провести анализ полезных параметров расчетных моделей и выбрать оптимальную конфигурацию из рассмотренных в рукописи.*

© Егоров А. И., Глуховский Е. М., Ткачук Г. Н., 2021

Ключевые слова: *кохлеарная имплантация; имплантируемый магнит; составной постоянный магнит; МРТ совместимый магнит; моделирование постоянных магнитов; Comsol Multiphysics; AC/DC Magnetic Fields, No Currents.*

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

Финансирование: *Данная статья подготовлена при проведении НИОКТР по теме «Разработка технологии изготовления и постановка на производство импортозамещающей многофункциональной системы кохлеарной имплантации для реабилитации пациентов с сенсоневральной тугоухостью» на базе лаборатории медицинского приборостроения МФТИ. Финансовая поддержка осуществлялась Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.*

Для цитирования: Егоров А. И., Глуховский Е. М., Ткачук Г. Н. Моделирование системы управления режимами токарной обработки с учетом изменения температуры в зоне резания // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 21–35.

Поступила в редакцию 26.12.2020 *Подписана в печать 28.01.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Investigation of Parameters and Improvement of MRI Compatible Composite Magnet for Cochlear Implantation

Evgeniy M. Glukhovskiy[1], Alexey I. Egorov[1], Georgii N. Tkachuk[1] ✉

[1] Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy alley, Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russian Federation

✉ e-mail: glukh.al@myrambler.ru

Abstract

The purpose of research *to analyze and compare the designs and useful parameters of the models which can be used in cochlear implantation systems in order to select the optimal design.*

Methods. *The article describes the work carried out in improving the utility models RU 198574, RU 196686, RU 2727227 and creating an external composite magnet. The authors analyzed composite magnets with a different number of magnetic elements (q = 4, 6, 8, 10), as well as the implementation of an internal magnet with and without filling the empty space with ferrofluid.*

Results. *This article describes the carried work to improve the utility models RU 198574, RU 196686, RU 2727227 to create the improved external composite magnet. The authors provide a model of a modified design of the body of the implantable part of the composite magnet to improve its characteristics. Also was developed an external magnet with cylindrical corpus and seats for cylindrical compound magnets located around the circumference. This design of both composite magnets prevents angular rotations of the composite magnets. This makes it possible to take into account the relative position of the supply and output wires to the receiving and transmitting antennas developing the electrical part of the implant. The article presents the results of modeling the magnetic field of composite magnets with various sizes of housings and magnetic elements. Schemes of the magnetic field distribution during the interaction of both compound magnets are presented in this manuscript as well as the forces of the attracting of the external part and implanted have been calculated. The authors provide a formula for calculating the maximum force of attraction of compound magnets, due to the blood pressure in the capillaries.*

Conclusion. *Hearing loss requires constant detailed study, and the systems used for the correction of pathology must have constantly been improved. These data made be possible to analyze the useful parameters of the computational models and select the optimal configuration from the considered models.*

Keywords: *cochlear implantation; composite permanent magnet; MRI-compatible magnet; simulation of permanent magnets; Comsol Multiphysics; AC/DC Magnetic Fields; No Currents.*

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

Funding: *This article was prepared during R & D on the topic "Development of manufacturing technology and commissioning of an import-substituting multifunctional cochlear implantation system for the rehabilitation of patients with sensorineural hearing loss "on the basis of the laboratory of Medical Instrumentation at MIPT. Financial support was provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation*

For citation: Glukhovskiy E. M., Egorov A. I., Tkachuk G. N. Investigation of Parameters and Improvement of MRI Compatible Composite Magnet for Cochlear Implantation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 21–35. (In Russ.)

Received 26.12.2020 *Accepted 28.01.2021* *Published 30.03.2021*

***

Введение

Кохлеарная имплантация является эффективным способом внедрения в активную жизнь взрослых, а главное – детей, страдающих потерей функции слуха. Современная наука стремится сделать жизнь людей, использующих кохлеарные импланты, максимально полноценной. Для этого проводится работа для усовершенствования и модификации существующих конструкций систем кохлеарной имплантации.

Внешняя (экстракорпоральная, съемная) часть кохлеарного импланта крепится к внутренней (имплантируемой) при помощи системы из двух составных магнитов. Внутренний магнит вживляется под кожу, а внешний располагается снаружи и удерживает себя и передающую внешнюю индуктивную катушку за счет магнитных сил [1].

Следует заметить, что внешний магнит имеет цилиндрическую форму со вложенными в него ответными магнитами, имеющими форму цилиндров [2]. Внешний и внутренний магниты располагаются друг относительно друга на одной оси. Количество магнитных элементов в каждом моделировании совпадает у обоих составных магнитов, а по радиальной координате магниты расположены таким образом, что каждая пара магнитных элементов (внешний + внутренний) имеет общую ось, т. е. магнитные элементы внешнего и внутреннего магнитов расположены друг напротив друга [3]. На практике при отсутствии на своем месте внешнего магнита шаровые магнитные элементы внутреннего составного магнита будут поворачиваться друг к другу противоположными полю-

сами, чтобы занять стационарное положение. В таком положении воздействие постоянного магнитного поля на внешнюю среду будет минимальным [4].

При установке внешнего магнита шаровые магнитные элементы будут поворачиваться по полю внешнего составного магнита, притягивая его. Конструкция системы предотвращает вращение внешней части кохлеарного имплантата вокруг общей оси [5].

Изначально предполагалось располагать цилиндрические элементы внешнего составного магнита с чередованием направления магнитных полюсов. При такой конфигурации важно сохранять четность количества магнитных элементов, поэтому в статье нами были рассмотрены конструкции с четным числом магнитных элементов, а также случаи с разнонаправленными (↑↓) и сонаправленными (↑↑) цилиндрическими магнитными элементами во внешнем корпусе [6].

Следует учитывать, что основными параметрами, которые являются важными при разработке такой системы магнитов, являются:

– МРТ-совместимость;

– сила притяжения составных магнитов;

– габаритные размеры;

– экономические показатели.

МРТ-совместимость достигается шарообразной формой магнитных элементов имплантируемого магнита, что дает возможность пациентам с такими имплантами проходить МРТ-обследование без хирургического извлечения внутреннего составного магнита [7].

Сила притяжения составных магнитов должна быть в таких пределах, чтобы внешняя часть оставалась на месте при движении пациента, но не была слишком сильной, чтобы не перекрывать ток крови в пятне контакта и не причинять дискомфорт пациенту [8]. На практике силу притяжения планируется варьировать, изменяя число магнитных элементов (q), высоту цилиндрических магнитных элементов (h_{cyl}) во внешнем составном магните, изменять взаимное расположение магнитных элементов (↑↓ и ↑↑) и изменять расстояние между магнитными элементами ($L_{magn} = L + 2h$). Последние три пункта можно будет изменять и после имплантации внутренней части [9]. И габаритные размеры разрабатываемых магнитов должны соответствовать размерам уже разработанных систем. При этом появляется экономическое преимущество системы имплантации: использование серийно выпускаемых магнитных элементов [10; 11; 12; 13].

Кохлеарные импланты передают питание и информацию через приемные и передающие антенны снаружи внутрь, а постоянный магнит находится с ними в непосредственной близости (2–4 мм). В этой связи для постоянного составного магнита были определены диапазоны расстояния:

– 1–3 мм – рабочий диапазон;

– 4–6 мм – граничный диапазон;

– ≥10 мм – дальний диапазон.

Материалы и методы

Имплантируемый магнит кохлеарного импланта имеет цилиндрический корпус из титана (форму таблетки), внутрь которого в цилиндрические углубления вкладываются шаровые магниты (рис. 1), сверху корпус закрывается крышкой.

Нами были рассмотрены составные магниты с различным количеством магнитных элементов (q = 4, 6, 8, 10 шт.) [1; 14].

Также нами была рассмотрена реализация внутреннего магнита с заполнением пустого пространства около шаровых магнитных элементов феррофлюидом и без него (рис. 2) [15].

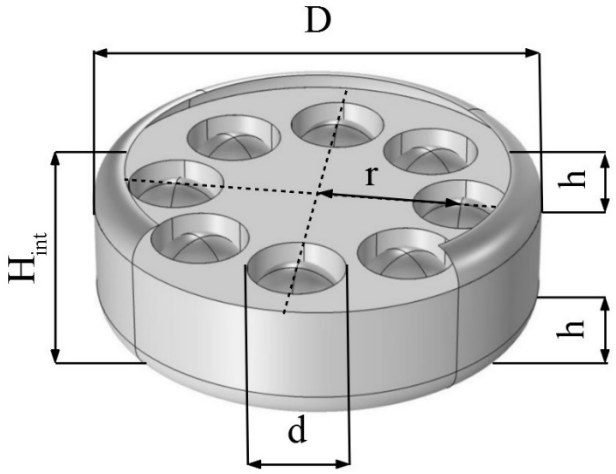


Рис. 1. Вид имплантируемого магнита (верхняя грань сделана прозрачной для наглядности)

Fig. 1. Type of implantable magnet (the upper edge was made transparent for better clarity)

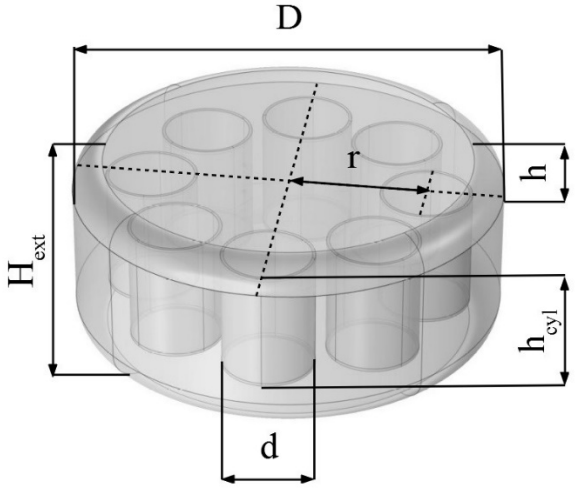


Рис. 2. Вид экстракорпорального (внешнего) магнита

Fig. 2. Type of extracorporeal (external) magnet

Результаты и их обсуждение

Оценка максимальной силы притяжения составных магнитов

При длительном ношении экстракорпоральной части кохлеарного импланта важно, чтобы в месте её контакта не перекрывалось движение крови.

Для оценки максимально допустимой силы следует использовать следующее соотношение (1):

$$F \le P_{\text{крови}} \cdot S_{\text{контакта}}, \qquad (1)$$

где F – сила притяжения магнитов, Н; $P_{\text{крови}}$ – давление крови в капиллярах человека, Па (возьмем минимально возможное давление в капиллярах, равное 10 мм рт. ст. [13]); $S_{\text{контакта}}$ – пятно контакта экстракорпоральной части, м^2.

Переведем давление: 10 мм рт. ст. = = 1333,22 Па.

В нашем случае передающая антенна и внешний магнит будут располагаться в жестком круглом корпусе и его радиус будет составлять 15 мм (r = 15 мм).

Подставим числа в соотношение (1):

$$F \le 1333,22\ [\text{Па}] \cdot \pi \cdot (15 \cdot 10^{-3}\ [\text{м}])^2 = = 0,9424\ \text{Н}.$$

Моделирование

Следующим этапом нашего исследования стало рассмотрение различных конфигураций имплантируемого магнита, для каждого из них – 3 конфигурации внешнего (для моделей № 1–4). Для каждой такой пары нами было проведено моделирование с заполнением пространства вокруг шаровых элементов внутреннего пространства составного магнита воздухом и феррофлюидом [16; 17; 18].

Феррофлюидом заполнялось все свободное пространство внутреннего магнита для изменения суммарных магнитных качеств всей системы, а также для использования феррофлюида в роли смазки. При моделировании нами не учитывалось влияние кожи на силу притяжения магнитов. Составные магниты располагались на расстоянии 2 мм друг от друга (модель 1–4, 6), что соответствует средней толщине кожного покрова (дерма) на голове взрослого человека [19]. На рисунке 3 приведен пример распределения магнитного поля в поперечном сечении магнитной системы при использовании феррофлюида [20].

На рисунке 4 приведено распределение магнитного поля такой же системы, но без заполнения свободного пространства вокруг шаровых элементов внутреннего составного магнита феррофлюидом [21].

На рисунках 3 и 4 цветом указывается напряженность магнитного поля в соответствующих областях, а стрелками указывается направление магнитных линий.

Для остальных конфигураций системы составных магнитов общая картина распределения магнитного поля соответствует приведенным выше.

В таблице 1 приведены результаты расчета силы притяжения составных магнитов.

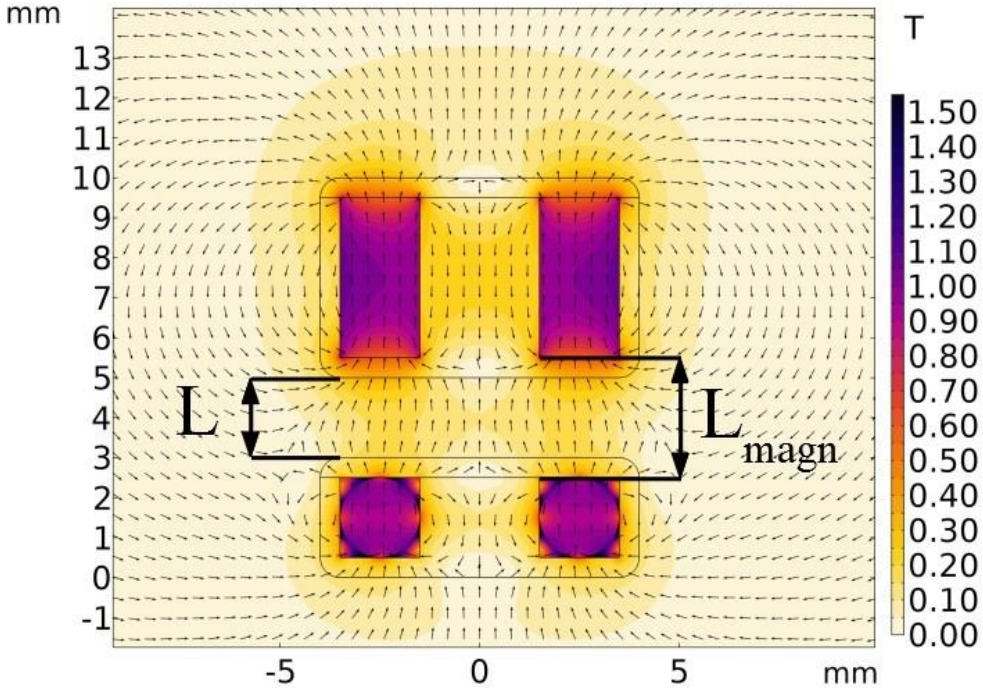


Рис. 3. Распределение магнитного поля в поперечном сечении системы составных магнитов с использованием феррофлюида

Fig. 3. Distribution of the magnetic field in the cross section of a compound magnets system with ferrofluidusing

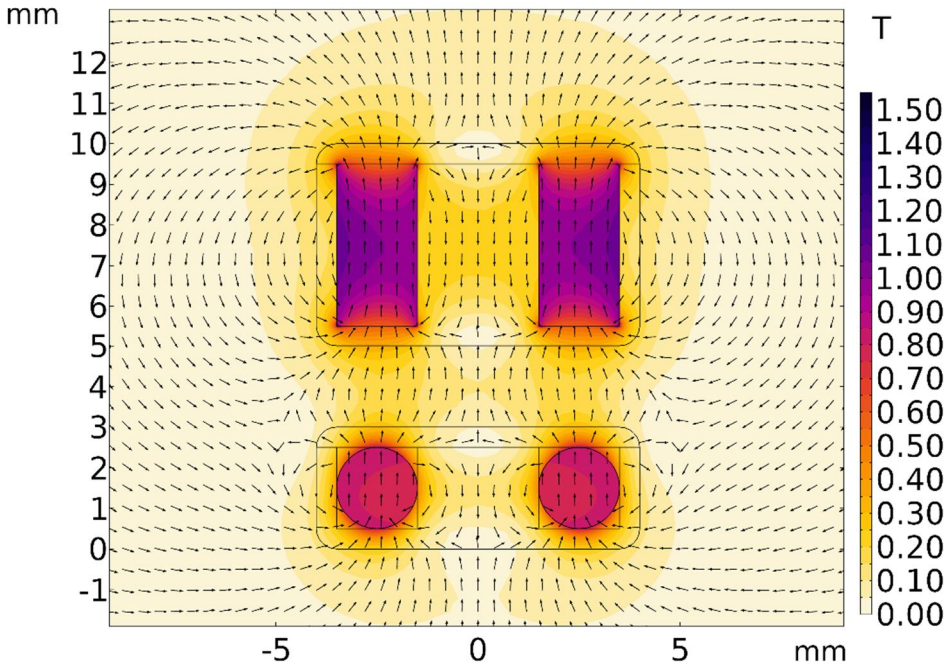


Рис. 4. Распределение магнитного поля в поперечном сечении системы составных магнитов без использования феррофлюида

Fig. 4. Distribution of the magnetic field in the cross section of the compound magnets system without ferrofluidusing

Таблица 1. Силы притяжения составных магнитов друг к другу

Table 1. The attraction forces of magnet compounds to each other

Имплантируемый (внутренний) составной магнит									Внешний составной магнит*			
									h_{cyl}, мм			
									4		6	8
№ модели	D · H_{int}, мм	q, штук	d, мм	r, мм	Ферро-флюид	h, мм	L, мм		↑↑	↑↓	↑↑	↑↑
1	8x3,5	6	2	2,5	Да	0,5	2		283,8	88,7	323,9	344,4
					Нет				318,3	100,4	359,4	379,9
2	10x4	8	2	3	Да	1	2		257,7	63,3	303,3	324,3
					Нет				292,8	72,8	341,7	364,2
3	12x4	10	2	4	Да	1	2		268,4	77,1	316,3	340,5
					Нет				302,7	86,3	353,8	378,7
4	14x5	8	3	4,5	Да	1	2		798,7	249,7	972,0	1088,5
					Нет				931,2	298,5	1105,1	1221,3
5	12x5	4	3	4	да	1	1		470,4	535,8	-	-
					Нет				546,9	608,7	-	-
6	12x5	4	3	4	Да	1	2		298,7	272,8	-	-
					Нет				328,5	310,6	-	-
7	12x5	4	3	4	Да	1	4		144,1	81,3	-	-
					Нет				160,4	91,9	-	-

*$H_{ext} = h_{cyl} + 2h$

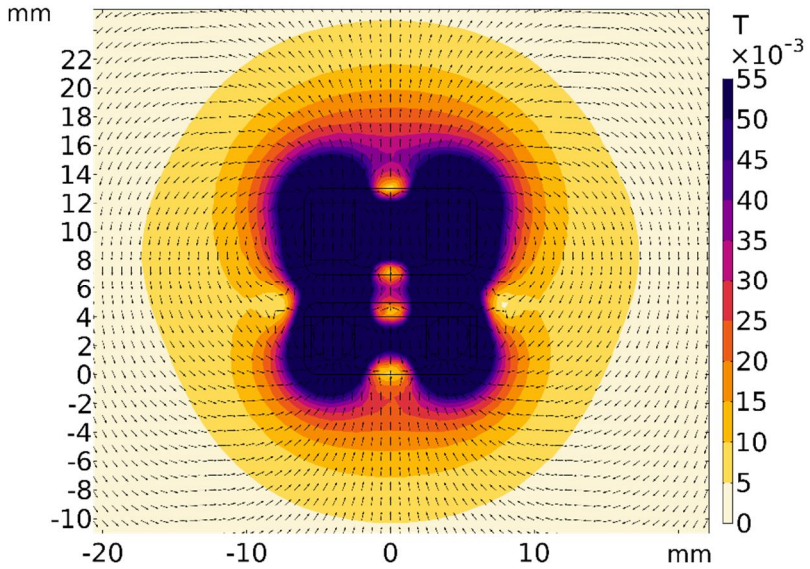


Рис. 5. Распределение магнитного поля в поперечном сечении системы составных магнитов с компоновкой ↑↑.

Fig. 5. Distribution of the magnetic field in the cross-section of a composite magnets system with a ↑↑ arrangement

Силы притяжения составных магнитов указаны в таблице 1 в ньютонах ($F \cdot 10^{-3}$ Н) для каждой из пар составных магнитов с различными параметрами [22]. При моделировании нами была замечена интересная особенность. Она заключается в том, что при компоновке ↑↓ магнитное поле оказалось более сконцентрировано. На рисунках 5 и 6 это показано более ярко, на примере модели № 6 – без феррофлюида [23; 24; 25].

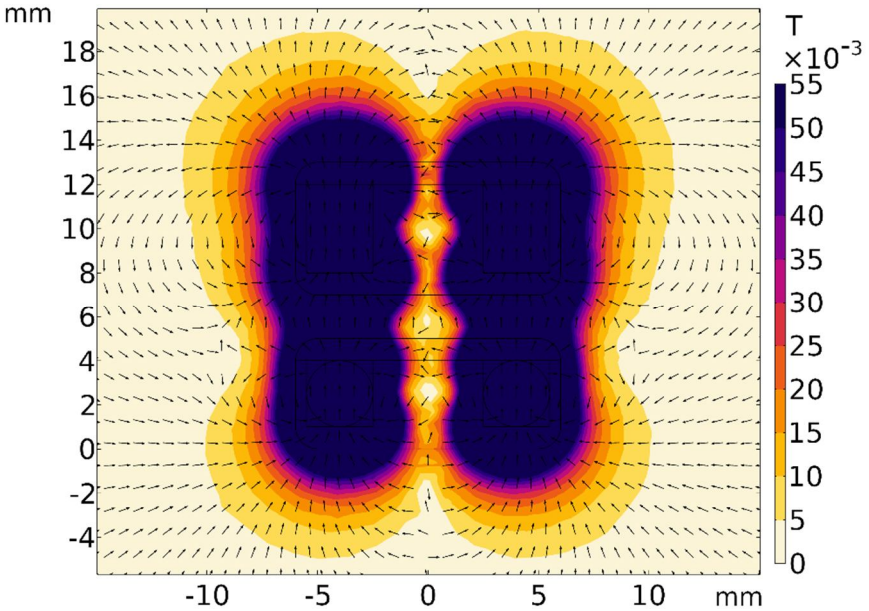


Рис. 6. Распределение магнитного поля в поперечном сечении системы составных магнитов со компоновкой ↑↓

Fig. 6. The magnetic field distribution in the cross-section of a composite magnets system with a ↑↓ arrangement

Выводы

Проведенное нами моделирование позволило сделать несколько важных выводов:

1. Наличие феррофлюида во внутреннем составном магните уменьшает силу притяжения.

2. Различная компоновка магнитных элементов (↑↓ и ↑↑) во внешнем составном магните позволяет получить дополнительные уровни для подбора оптимальной силы притяжения составных магнитов на серийных неодимовых магнитах. На малых расстояниях (L_{magn} порядка 3 мм) мы получаем увеличение в силе, а уже с 4 мм – уменьшение. Это может быть полезно при подборе силы притяжения составных магнитов, когда внутренняя часть уже установлена пациенту.

3. Разнонаправленная компоновка (↑↓) магнитных элементов более предпочтительна. Она позволяет увеличить силу притяжения в рабочем диапазоне, что обеспечивает лучшее центрирование (по общей оси и по углу поворота вокруг этой оси) экстракорпоральной части. Благодаря подобной компоновке можно добиться меньшего распространения по-

стоянного магнитного поля в пространство, что меньше влияет на работу передающей и принимающей частей кохлеарного импланта, а также на другую медицинскую технику и медицинские сканеры, которые могут использоваться параллельно с кохлеарным имплантом.

По результатам работы нами была выбрана оптимальная конфигурация внешнего и внутреннего составных магнитов, рассмотренная в моделированиях 5-7. Такая конфигурация дает оптимальную силу притяжения при минимальных размерах составных магнитов.

Внедрение полученных результатов в практику

При создании тестового образца толщину верхней и нижней стенок корпуса имплантируемого составного магнита планируется уменьшить до 0,5 мм для достижения меньшей толщины. В такой конфигурации общая толщина магнита будет составлять 4 мм.

С учетом крепления для приемной катушки общая толщина имплантата будет составлять до 5 мм. По данным производителя кохлеарных имплантов Cochlear, их устройства серии Nucleus CI имеют толщину 3,9 мм. По данным компании Medel, их кохлеарные импланты Synchrony, Concerto, Sonata имеют толщину 3,3 мм в районе приемной катушки. Определенная в данной статье оптимальная конфигурация внутреннего составного магнита имеет сопоставимые габаритные размеры.

Список литературы

1. Пат. 198574 Российская Федерация. Магнит кохлеарного имплантата на шаровых элементах / Глуховский Е. М., Грибок В. П., Егоров А. И. Заявл. 18.03.20; опубл. 16.07.2020, Бюл. № 20.

2. Adverse Events and Discomfort During Magnetic Resonance Imaging in Cochlear Implant Recipients / B. G. Kim, J. W. Kim, J. J. Park, S. H. Kim, H. N. Kim, J. Y. Choi // JAMA Otolaryngol Head Neck Surg. 2015. N 141(1). P. 45–52. https://doi.org/10.1001/jamaoto.2014.2926.

3. Cochlear implant magnet displacement during magnetic resonance imaging / S. Deneuve, N. Loundon, N. Leboulanger, I. Rouillon, E. N. Garabedian // Otol Neurotol. 2008. N 29(6). P. 789–790. https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3181825695.

4. Reversing the polarity of a cochlear implant magnet after magnetic resonance imaging / J. H. Jeon, M. R. Bae, J. W. Chang, J. Y. Choi // Auris Nasus Larynx. 2012. N 39(4). P. 415–417. doi: https://doi.org/10.1016/j.anl.2011.04.018.

5. Majdani O., Leinung M., Rau T. Demagnetization of cochlear implants and temperature changes in 3.0 T MRI environment // Otolaryngol Head Neck Surg. 2008. N 139. P. 833–839. https://doi.org/10.1016/j.otohns.2008.07.026.

6. Cochlear implant with a non-removable magnet: preliminary research at 3-T MRI / F. Dubrulle, A. S. Iancu, C. Vincent, G. Tourrel, O. Ernst // European Radiology. 2013. N 23. P. 1510–1518. https://doi.org/10.1007/s00330-012-2760-3.

7. Patent 107308543 (A) CN. Cochlear implant magnet and device / T. Zhiping, S. Xiaoan, X. Shiang, Q. Shuqi. 03.11.17.

8. Patent 2018296826 (A1) US. Magnets in the Cochlear implants systems / S. J. Lee, J. L. Walter, J. G. E. Smith, U. Gommel, S. M. Reed. 18.10.18.

9. Patent 110545880 (A) CN. Cochlear implants having impact resistant MRI-compatible magnet apparatus / J. Smith, S. Lee. 06.12.19.

10. Patent 2016191429A1. WO Cochlear implants having impact resistant MRI- compatible magnet apparatus / J. Smith, S. Lee. 01.12.16.

11. Судаков К. В. Нормальная физиология. М.: Медицинское информационное агенство, 2006. 918 с.

12. Елисеева Ю. Ю. Заболевания кожи: полный справочник. М.: Эскимо, 2011.

13. Skarzynski H., Podskarbi-Fayette R. A new cochlear implant electrode design for preservation of residual hearing: a temporal bone study // Acta Otolaryngol. 2018. N 30. P. 435–42. https://doi.org/10.3109/00016480903283733.

14. Пат. 196686 Российская Федерация. Магнит кохлеарного имплантата на шаровых элементах / Глуховский Е. М., Грибок В. П., Егоров А. И. Заявл. 12.12.19; опубл. 11.03.20, Бюл. № 8.

15. Пат. 2727227 Российская Федерация. Магнит для кохлеарного имплантата на сферических магнитных элементах / Глуховский Е. М., Грибок В. П., Егоров А. И. Заявл. 21.08.19; опубл. 21.07.20, Бюл. № 21.

16. Preservation of low-frequency residual hearing after cochlear implantation. Is soft surgery effective? / V. J. O. Verhaegen, F. M. Snik, A. J. Beynon, A. Rens Leeuw, E. A. M. Mylanus // J. Int Adv. Otol. 2010. N 6. P. 125–130. https://doi.org/repository.ubn.ru.nl/bitstream/handle/2066/89669/89669.pdf?sequence=1.

17. A new electrode for residual hearing preservation in cochlear implantation: first clinical results / W. Gstoettner, S. Helbig, C. Settevendemie, U. Baumann, J. Wagenblast, C. Arnoldner // Acta Otolaryngol. 2009. N 129. P. 372–379. https://doi.org/10.1080/00016480802552568.

18. Hearing conservation surgery using the Hybrid-L electrode. Results from the first clinical trial at the Medical University of Hannover / T. Lenarz, T. Stöver, A. Buechner, A. Lesinski-Schiedat, J. Patrick, J. Pesch // Audiol Neurotol. 2009. N 14. P. 22–31. https://doi.org/10.1159/000206492.

19. Conservation of residual acoustic hearing after cochlear implantation / T. J. Balkany, S. S. Connell, A. V. Hodges [et al.] // Otol Neurotol. 2006. N 27. P. 1083–1088. https://doi.org/10.1097/01.mao.0000244355.34577.85.

20. Preservation of residual hearing in children and post-lingually deafened adults after cochlear implantation: an initial study / H. Skarzyński, A. Lorens, P. D'Haese [et al.] // ORL J. Otorhinolaryngol Relat Spec. 2002. N 64. P. 247–253. https://doi.org/10.1159/000064134.

21. Comparison of Hearing Preservation Outcomes Using Extended Versus Single-Dose Steroid Therapy in Cochlear Implantation / G. L. Gotamco, Y.-F. Chou, Ch.-H. Sun, Ch.-J. Hsu, P.-R. Chen, H.-P. Wu // Otology & Neurotology. 2020. N 41(4). P. 449–457. https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002570.

22. Residual hearing in cochlear implant patients / W. Di Nardo, I. Cantore, P. Melillo, F. Cianfrone, A. Scorpecci, G. Paludetti // Eur Arch Otorhinolaryngol. 2007. N 264. P. 855–860. https://doi.org/10.1007/s00405-007-0270-8.

23. Preservation of Vestibular Function and Residual Hearing After Round Window Cochlear Implantation / K. J. Stuermer, H. D. Kluenter, R. Lang-Roth, D. Schwarz, K.-B. Hüttenbrink, A. Anagiotos // Otology & Neurotology. 2019. N 40(7). P. 878–882. https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002257.

24. Cochleostomy site: implications for electrode placement and hearing preservation / R. J. Briggs, M. Tykocinski, K. Stidham, J. B. Roberson // Acta Otolaryngol. 2005. N 125. P. 870–876. https://doi.org/10.1080/00016480510031489.

25. Preservation of Residual Hearing After Cochlear Implant Surgery With Deep Insertion Electrode Array / C. Sierra, M. Calderón, E. Bárcena, A. Tisaire, E. Raboso // Otology and Neurotology. 2019. N 40(4). P. 373–380. https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002170.

References

1. Glukhovskiy E. M., e. a. Magnit kokhlearnogo implantata na sharovykh elementakh [Cochlear implant magnet on ball elements]. Patent RF, no. 198574, 2020.

2. Kim B. G., Kim J. W., Park J. J., Kim S. H., Kim H. N., Choi J. Y. Adverse Events and Discomfort During Magnetic Resonance Imaging in Cochlear Implant Recipients. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg*, 2015, no. 141(1), pp. 45–52. https://doi.org/10.1001/jamaoto.2014.2926

3. Deneuve S., Loundon N., Leboulanger N., Rouillon I., Garabedian E. N. Cochlear implant magnet displacement during magnetic resonance imaging. *Otol Neurotol*, 2008, no. 29(6), pp. 789–790. https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3181825695

4. Jeon J. H., Bae M. R., Chang J. W., Choi J. Y. Reversing the polarity of a cochlear implant magnet after magnetic resonance imaging. *Auris Nasus Larynx*, 2012, no. 39(4), pp. 415–417. https://doi.org/10.1016/j.anl.2011.04.018

5. Majdani O., Leinung M., Rau T. Demagnetization of cochlear implants and temperature changes in 3.0 T MRI environment. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 2008, no. 139, pp. 833–839. https://doi.org/10.1016/j.otohns.2008.07.026

6. Dubrulle F., Iancu A. S., Vincent C., Tourrel G., Ernst O. Cochlear implant with a non-removable magnet: preliminary research at 3-T MRI. *European Radiology*, 2013, no. 23, pp. 1510–1518. https://doi.org/10.1007/s00330-012-2760-3

7. Zhiping T., e. a. Cochlear implant magnet and device. Patent CN, no. 107308543 (A), 2017.

8. Lee S. J., e. a. Magnets in the Cochlear implants systems. Patent US, no. 2018296826 (A1), 2018.

9. Smith J., e. a. Cochlear implants having impact resistant MRI-compatible magnet apparatus. Patent CN, no. 110545880 (A), 2019.

10. Smith J., e. a. Cochlear implants having impact resistant MRI-compatible magnet apparatus. Patent WO, no. 2016191429A1, 2016.

11. Sudakov K. V. Normal'naya fiziologiya [Normal Physiology]. Moscow, Medical Informative Agency Publ., 2006. 918 p.

12. Eliseeva Yu. Yu. Zabolevaniya kozhi [Skin diseases]. Moscow, Eskimo Publ., 2011.

13. Skarzynski H., Podskarbi-Fayette R. A new cochlear implant electrode design for preservation of residual hearing: a temporal bone study. *Acta Otolaryngol*. 2018, no. 30, pp. 435–442. https://doi.org/10.3109/00016480903283733

14. Glukhovskiy E. M., e. a. Magnit kokhlearnogo implantata na sharovykh elementakh [Cochlear implant magnet on ball elements]. Patent RF, no. 196686, 2020.

15. Glukhovskiy E. M., e. a. Magnit dlya kokhlearnogo implantata na sfericheskikh magnitnykh elementakh [Cochlear implant magnet on spherical magnetic elements]. Patent RF, no. 2727227, 2020.

16. Verhaegen V. J. O., Snik F. M., Beynon A. J., Rens Leeuw A., Mylanus E. A. M. Preservation of low-frequency residual hearing after cochlear implantation. Is soft surgery effective? *J. Int. Adv. Otol*, 2010, no. 6, pp. 125–130. https://doi.org/repository.ubn.ru.nl/bitstream/handle/2066/89669/89669.pdf?sequence=1

17. Gstoettner W., Helbig S., Settevendemie C., Baumann U., Wagenblast J., Arnoldner C. A new electrode for residual hearing preservation in cochlear implantation: first clinical results. *Acta Otolaryngol*, 2009, no. 129, pp. 372–379. https://doi.org/ 10.1080/ 00016480802552568

18. Lenarz T., Stöver T., Buechner A., Lesinski-Schiedat A., Patrick J., Pesch J. Hearing conservation surgery using the Hybrid-L electrode. Results from the first clinical trial at the Medical University of Hannover. *Audiol Neurotol*, 2009, no. 14, pp. 22–31. https://doi.org/10.1159/000206492

19. Balkany T. J., Connell S. S., Hodges A. V., eds. Conservation of residual acoustic hearing after cochlear implantation. *Otol Neurotol*, 2006, no. 27, pp. 1083–1038. https://doi.org/ 10.1097/01.mao.0000244355.34577.85

20. Skarzyński H., Lorens A., D'Haese P., eds. Preservation of residual hearing in children and post-lingually deafened adults after cochlear implantation: an initial study. *ORL J. Otorhinolaryngol Relat Spec*., 2002, no. 64, pp. 247–253. https://doi.org/10.1159/000064134

21. Gotamco G. L., Chou Y.-F., Sun Ch.-H., Hsu Ch.-J., Chen P.-R., Wu H.-P. Comparison of Hearing Preservation Outcomes Using Extended Versus Single-Dose Steroid Therapy in Cochlear Implantation. *Otology & Neurotology*, 2020, no. 41(4), pp. 449–457 https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002570.

22. Di Nardo W., Cantore I., Melillo P., Cianfrone F., Scorpecci A., Paludetti G. Residual hearing in cochlear implant patients. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2007, no. 264, pp. 855–60. https://doi.org/10.1007/s00405-007-0270-8

23. Stuermer K. J., Kluenter H. D., Lang-Roth R., Schwarz D., Hüttenbrink K.-B., Anagiotos A. Preservation of Vestibular Function and Residual Hearing After Round Window Cochlear Implantation. *Otology & Neurotology.* 2019, no. 40(7), pp. 878–882. https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002257

24. Briggs R. J., Tykocinski M., Stidham K., Roberson J. B. Cochleostomy site: implications for electrode placement and hearing preservation. *Acta Otolaryngol*, 2005, no. 125, pp. 870–876. https://doi.org/10.1080/00016480510031489

25. Sierra C., Calderón M., Bárcena E., Tisaire A., Raboso E. Preservation of Residual Hearing After Cochlear Implant Surgery With Deep Insertion Electrode Arrays. *Otology and Neurotology*, 2019, no. 40(4), pp. 373–380. https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002170

Информация об авторах / Information about the Authors

Глуховский Евгений Михайлович, младший научный сотрудник лаборатории медицинского приборостроения, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация, e-mail: glukh.al@myrambler.ru

Evgeniy M. Glukhovskiy, Research Assicstant of the Medical Instrumentation Laboratories, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: glukh.al@myrambler.ru

Егоров Алексей Игоревич, кандидат физико-математических наук, заведующий лаборатории медицинского приборостроения, Московский физико-технический институт,
г. Долгопрудный, Московская область,
Российская Федерация,
e-mail: egorov_aleksei.i@mipt.ru

Alexey I. Egorov, Cand. of Sci. (Physico-mathematical), Head of the Medical Instrumentation Laboratories, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation,
e-mail: glukh.al@myrambler.ru

Георгий Николаевич Ткачук, лаборант лаборатории медицинского приборостроения, Московский физико-технический институт,
г. Долгопрудный, Московская область,
Российская Федерация,
e-mail: TkachukGN@phystech.edu

Georgii N. Tkachuk, Laboratory Assistant of the Medical Instrumentation Laboratories, Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region,
Russian Federation,
e-mail: TkachukGN@phystech.edu

Оригинальная статья / Original article

УДК 620.192.34

О применении резонансного контура для оценки наличия пор в структуре компаунда

Д. А. Четвериков[1] ✉, Е. В. Гостенков[1]

[1] Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева
Наугорское шоссе 29, г. Орел 302020, Российская Федерация

✉ e-mail: dimachetverikov@gmail.com

Резюме

Цель исследования *– определить возможность применения резонансного контура для оценки наличия пор в структуре компаунда для взрывонепроницаемого оборудования, данное направление является одним из перспективных в настоящее время.*

Методы. *В данной работе приведено теоретическое описание возникновения резонанса в колебательном контуре, что говорит о возможности применения резонансного метода контроля для определения наличия пор в структуре компаунда. Для определения наличия пустот в компаунде были исследованы электрические параметры путем рассмотрения электрической цепи. Основываясь на изменении резонансной частоты RLC-контура, рассмотрена возможность оценочного суждения о наличии пор в структуре заливочного компаунда. На основании изменения количества вещества диэлектрика между обкладками конденсатора его емкости установлено изменение резонансной частоты.*

Результаты. *Экспериментальное подтверждение теоретического описания, которое представлено в работе, доказало корректность изложенной информации. Описан разработанный авторами метод оценочного контроля наличия пор в структуре компаунда, приведено описание оборудования, применяемого для разработанного метода. Произведена серия измерений, направленных на определение частоты, на которой наблюдается явление резонанса. Произведено исследование реальных образцов компаунда. В ходе экспериментальной работы установлена зависимость емкости конденсатора от количества вещества диэлектрика. Основываясь на знании о емкости конденсатора, подтверждена возможность оценочного суждения о наличии пор в структуре компаунда, применяемого в качестве диэлектрика в конденсаторе, установленном в колебательном контуре.*

Заключение. *По итогу проведенной работы сделаны выводы о применение резонансного метода контроля для оценки наличия пор в структуре компаунда. Установлена и доказана зависимость изменения частоты резона, возникающая в колебательном контуре, от однородности вещества компаунда, применяемого в качестве диэлектрика в конденсаторе.*

Ключевые слова: *RLC-контур; заливочный компаунд; метод контроля; плоское соединение.*

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

© Четвериков Д. А., Гостенков Е. В., 2021

Для цитирования: Четвериков Д. А., Гостенков Е. В. О применении резонансного контура для оценки наличия пор в структуре компаунда // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 36–49.

Поступила в редакцию 10.01.2021 *Подписана в печать 11.02.2021* *Опубликована 30.03.2021*

On the Application of a Resonance Circuit to Assess the Presence of Pores in the Structure of the Compound

Dmitry A. Chetverikov[1] ✉, Evgeny V. Gostenkov[1]

[1] Oryol State University named after I. S. Turgenev
29 Naugorskoe highway, Orel 302020, Russian Federation

✉ e-mail: dimachetverikov@gmail.com

Abstract

The purpose of research *is to determine the possibility of using a resonant circuit to assess the presence of pores in the structure of a compound for explosion-proof equipment, this direction is one of the most promising at present.*

Methods. *In this work, a theoretical description of the occurrence of resonance in the oscillatory circuit is given, which indicates the possibility of using the resonant control method to determine the presence of pores in the structure of the compound. To determine the presence of voids in the compound, electrical parameters were examined by considering the electrical circuit. Based on the change in the resonant frequency of the RLC circuit, the possibility of a value judgment on the presence of pores in the structure of the casting compound is considered. Based on the change in the amount of dielectric substance between the plates of the capacitor, the change in its capacitance, the change in the resonant frequency is established.*

Results. *The experimental confirmation of the theoretical description, which is presented in the work, proved the correctness of the information presented. The authors describe the method for evaluating the presence of pores in the structure of the compound, developed by the authors, and the description of the equipment used for the developed method. A series of measurements was made to determine the frequency at which the resonance phenomenon is observed. A study of real samples of the compound was carried out. In the course of the experimental work, the dependence of the capacitance of the capacitor on the amount of the dielectric substance was established. Based on the knowledge about the capacitance of the capacitor, the possibility of a value judgment on the presence of pores in the structure of the compound used as a dielectric in a capacitor installed in an oscillatory circuit has been confirmed.*

Conclusion. *Based on the results of the work carried out, conclusions were drawn about the use of the resonance control method to assess the presence of pores in the structure of the compound. The dependence of the change in the resonance frequency arising in the oscillatory circuit on the homogeneity of the compound substance used as a dielectric in the capacitor has been established and proved.*

Keywords: *RLC-circuit; potting compound; control method; flat connection.*

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

For citation: Chetverikov D. A., Gostenkov E. V. On the Application of a Resonance Circuit to Assess the Presence of Pores in the structure of the Compound. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 36–49. (In Russ.)

Received 10.01.2021 *Accepted 11.02.2021* *Published 30.03.2021*

***

Введение

Применение заливочных компаундов является современной тенденцией при производстве взрывозащищенного осветительного оборудования. Современные компаунды позволяют эксплуатировать оборудование в различных температурных диапазонах, а также в средах, где встречаются взрывоопасные газовые соединения. В связи со спецификой применения вопрос контроля наличия пор в компаунде является актуальной задачей. Применение резонансного метода контроля для оценочного определения наличия пор в структуре компаунда является перспективным направлением.

В составе взрывозащищенного оборудования компаунд возможно применять не только для улучшения тепловой эффективности [1; 2], но и как часть взрывонепроницаемого соединения. В силу особенностей конструкции взрывонепроницаемого соединения отсутствует возможность проведения оценки наличия пор в структуре компаунда. На рисунке 1 приведен пример плоского соединения с применением компаунда.

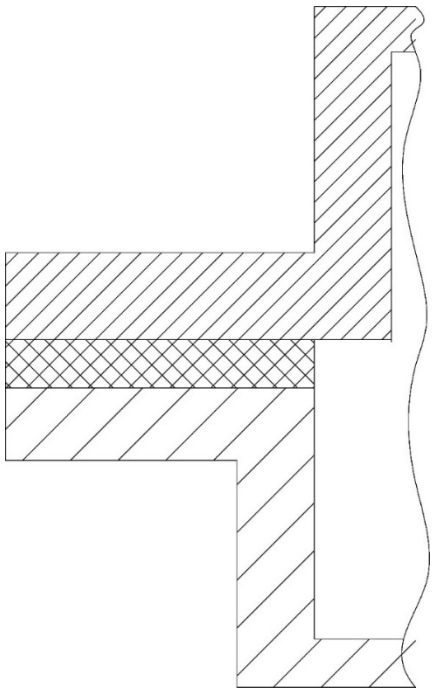


Рис. 1. Плоское соединение закрытого типа

Fig. 1. Flat type closed connection

В случае наличия пор в плоскости соединения требование непрерывности компаунда будет нарушено. Наличие сквозных пор возможно контролировать различными методами [3].

Классическим методом заливки компаунда является заливка и сушка при разряженном давлении. На рисунке 2 приведено изображение компаунда после выполнения указанных операции.

Рис. 2. Кратеры на поверхности компаунда

Fig. 2. Craters on the surface of the compound

Как видно из представленного изображения, на поверхности наблюдаются единичные кратеры, а также их скопления. Кратеры свидетельствуют о наличии воздушных прослоек в объеме компаунда [4; 5].

На основании представленного оценка наличия пустот в объеме компаунда является актуальной задачей. Для определения наличия пустот предлагается исследовать электрические параметры [6], для чего воспользуемся резонансным методом контроля [3].

Материалы и методы

Емкость плоского конденсатора, которым фактически является плоское взрывонепроницаемое соединение с компаундом, вычисляется по формуле (1):

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обклад-

ками конденсатора; S – площадь обкладок конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

Учитывая, что геометрические размеры конденсатора известны [7] (площадь сопрягаемых поверхностей и расстояние между ними), то, измерив емкость конденсатора, возможно вычислить диэлектрическую проницаемость компаунда, применяемого в соединение согласно формуле (2):

$$\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}. \quad (2)$$

Для вычисления емкости конденсатора по его проводимости в цепи переменного тока воспользуемся схемой [8], приведенной на рисунке 3.

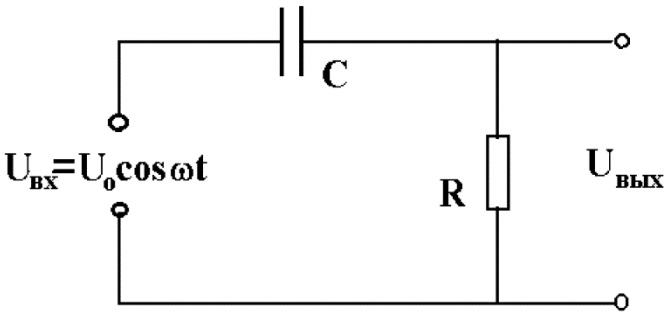


Рис. 3. Схема измерения проводимости конденсатора

Fig. 3. Scheme for measuring the conductivity of a capacitor

Отношение амплитуды выходного и входного напряжения называют коэффициентом передачи K [9; 10; 11]. В рассматриваемой цепи – это отношение амплитуды напряжения на резисторе U_{0R} к амплитуде поданного на цепь напряжения U_0 от генератора. Таким образом, коэффициент передачи вычисляется по формуле (3) [12; 13]:

$$K = \frac{U_{0R}}{U_0}. \quad (3)$$

Согласно закону Ома для переменного тока, амплитуда силы тока и напряжения связаны отношением (4):

$$U_0 = I_0\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (4)$$

Таким образом, амплитуда напряжения на резисторе вычисляется по формуле (5) [14]:

$$U_0 = I_0 R = \frac{U_0 \omega RC}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}. \quad (5)$$

Следовательно, выражение (3) примет вид (6):

$$K = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}, \quad (6)$$

Выразим емкость конденсатора согласно представленным выражениям (7):

$$C_{\text{р}} = \frac{K}{\omega R\sqrt{1 - K^2}}. \quad (7)$$

На практике вычисленное значение емкости конденсатора в схеме будет отличаться от емкости одиночного конден-

сатора [15; 16]. Данное явление обусловлено тем, что между элементами цепи, как и между цепью и проводниками, расположенными вблизи нее, вследствие явления электромагнитной индукции возникают дополнительные емкости [17; 18], которые принято считать паразитными [6]. Таким образом, выражение (2) примет вид

$$\varepsilon = \frac{(C_{\text{р}} - C_{\text{пар}})d}{\varepsilon_0 S} \qquad (8)$$

где $C_{\text{р}}$ – реально измеренная емкость; $C_{\text{пар}}$ – суммарная паразитная емкость цепи.

Результаты и их обсуждение

Опираясь на приведенный выше теоретический аппарат, произведем исследование реальных образцов компаунда. Для чего воспользуемся установкой, принципиальная схема которой приведена на рисунке 4.

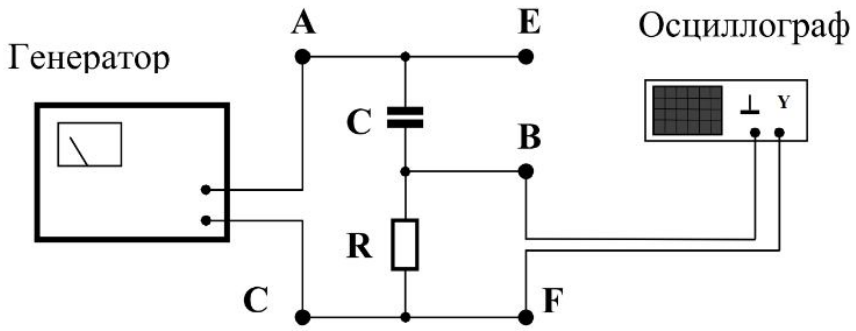


Рис. 4. Принципиальная схема установки

Fig.4. Schematic diagram of the installation

Установим разборный конденсатор C и измерительное сопротивление R на установку. Нижняя обкладка конденсатора неподвижно зафиксирована в цепи. Верхняя обкладка съемная. Исследуемый образец компаунда фиксируется между верхней и нижней обкладками конденсатора [19].

Для измерения емкости конденсатора в точку A схемы подается сигнал переменного напряжения от генератора импульсов. Измерения амплитуды генератора осуществляют при помощи вольтметра, входящего в состав генератора импульсов. С учетом входных емкостей кабеля и электронного осциллографа $C_{\text{вх}}$, входного сопротивления электронного осциллографа $R_{\text{вх}}$ и паразитных емкостей монтажа $C_{\text{пар}}$ схема измерения имеет вид, представленный ниже (рис. 5).

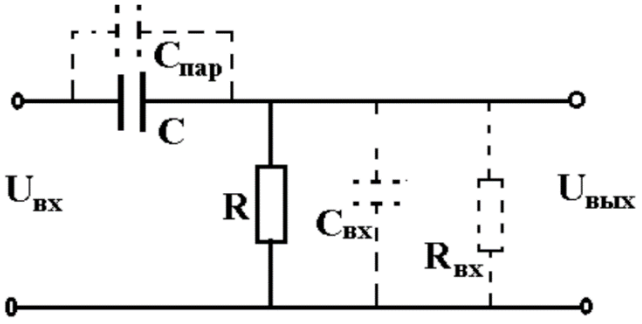


Рис. 5. Эквивалентная схема

Fig. 5. Equivalent circuit

Измерение значения сопротивления резистора *R* произведем в точках *B* и *C*. Таким образом, полученных данных достаточно для получения значений емкостей конденсатора.

Изготовим образцы конденсаторов. Воспользуемся металлическими пластинами размером 30×10×4 мм. Нанесем небольшое количество компаунда на одну из пластин, после чего в часть образцов поместим алюминиевую проволоку толщиной 0,04 мм и установим вторую металлическую пластину. Высушим компаунд в течение трех часов (после «схватывая» компаунда), после чего удалим проволоку [20]. Таким образом, получим 10 образцов конденсаторов с ярко выраженными пустотами и 10 конденсаторов с полнотелым компаундом. Осуществим окончательную сушку полученных изделий согласно рекомендациям производителя. Подключим полученные конденсаторы к измерительной установке, схема которой приведена выше. Результат измерения емкостей конденсаторов приведен в таблице 1.

Таблица 1. Результат измерения емкостей

Table 1. Result of measuring capacities

№ измерения	Образец с порами, $x \cdot 10^{-13}$ Ф	Образец без пор, $x \cdot 10^{-13}$ Ф
1	1,6448	1,6704
2	1,6511	1,6085
3	1,6377	1,6066
4	1,6323	1,6073
5	1,6716	1,6178
6	1,6365	1,6061
7	1,6392	1,6052
8	1,6276	1,6086
9	1,6377	1,6069
10	1,6494	1,6238

Продолжим исследование изготовленных конденсаторов в колебательном RLC-конуре, для чего поочередно подключим конденсаторы согласно схеме, приведенной на рисунке 6.

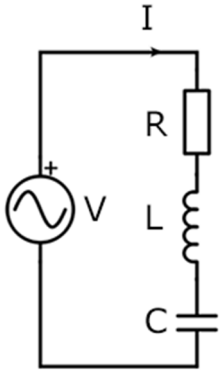


Рис. 6. Схема RLC-контура

Fig. 6. RLC circuit diagram

Подключение четырехканального осциллографа параллельно конденсатору и катушке индуктивности позволит наблюдать изменение напряжений на рассматриваемых элементах. Учитывая, что значения будут разнополярны, реактивное сопротивление будет равно нулю, а напряжение на катушке индуктивности и конденсаторе будут в противофазе и компенсируют друг друга. Важно помнить, что полное сопротивление рассматриваемой цепи будет равно активному сопротивлению, что приведёт к увеличению тока через элементы цепи, а значит, и к увеличению напряжения на элементах. Параметры RLC-контура: сопротивление, R = 100 Ом, индуктивность, L = 2,16 МГн.

Произведем серию измерений, направленных на определение частоты, на которой наблюдается явление резонанса. Результат приведен в таблице 2.

Таблица 2. Резонансные частоты

Table 2. Resonant frequencies

№ измерения	Образец с принудительными порами, МГц	Образец без принудительных пор, МГц
1	8,5425	8,4454
2	8,5423	8,4510
3	8,6491	8,4548
4	8,545	8,4456
5	8,543	8,4598
6	8,5422	8,4328
7	8,7631	8,4383
8	8,5857	8,4400
9	8,4568	8,4724
10	8,5358	8,4324

На рисунке 7 и рисунке 8 приведен график распределения значений полученных частот. На рисунке 9 видно, что разброс значений для образца с принудительными порами больше, чем для значений без пор.

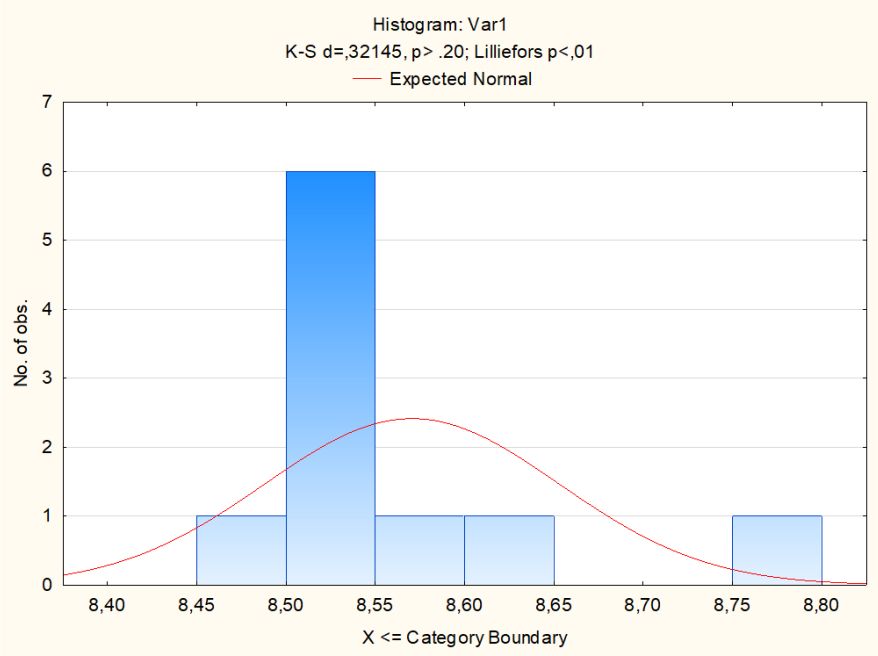


Рис. 7. Диаграмма распределений

Fig. 7. Diagram of distributions

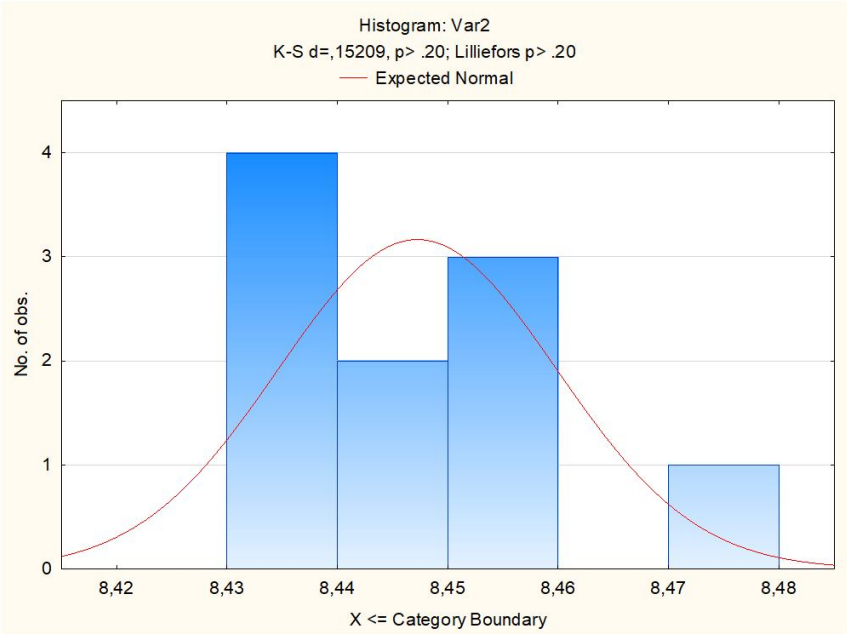


Рис. 8. Диаграмма распределений

Fig. 8. Diagram of distributions

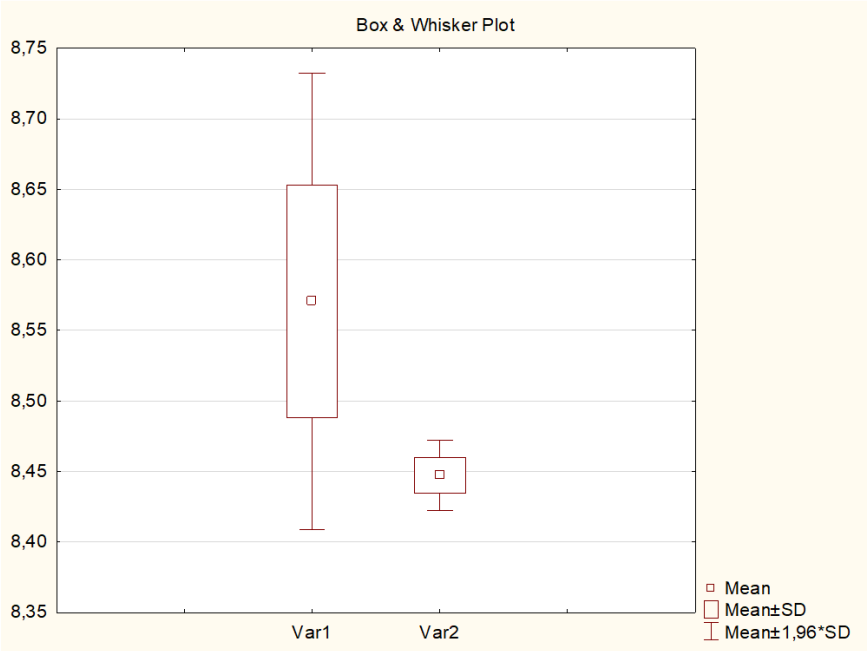


Рис. 9. График статистических параметров

Fig. 9. Graph of statistical parameters

Таким образом, проведенный эксперимент позволяет подтвердить выдвинутую теорию о возможности применения резонансного метода для контроля наличия пустот в компаунде.

Выводы

По результатам теоретических и экспериментальных данных можно сделать вывод, что соединение *металл-компаунд-металл* возможно рассматривать как конденсатор. Используя данные, предоставляемые производителем компаунда, возможно получить информацию о емкости конденсатора. Основываясь на знании о природе возникновения резонансных колебаний, можно рассчитать теоретическую частоту колебаний.

Предложенный метод резонансного контроля возможно применять при промышленной эксплуатации. Результат проведенных экспериментов позволяет сделать заключение об оценке наличия пор в слоях компаунда, присутствующего в плоском соединении взрывозащищенной оболочки. Однако следует понимать, что предложенный метод имеет исключительно оценочное заключение и не отвечает на вопрос о размерах пустот, природе их возникновения, а также суммарных площадях пустот.

Подводя итог, следует отметить, что применение резонансного метода контроля для оценки наличия пор в структуре компаунда, применяемого в составе взрывозащищенного осветительного оборудования, позволяет оперативно дать заключение о непрерывности пути компаунда в плоском соединении.

Список литературы

1. Фридман Л. Б. Механические свойства металлов. М.: Оборонгиз, 1962. 188 с.

2. Теплометрия: теория, метрология, практика: монография: в 3 кн. / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.]; под ред. д-ра техн. наук Т. Г. Грищенко; Институт технической теплофизики НАН Украина. Киев, 2017. Кн. 1. 438 с.

3. Грядунова Е. Н., Корндорф С. Ф., Горин А. В. Контроль герметичности изделий, заполненных предельными углеводородами: монография. Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. 86 с.

4. Технология конструкционных материалов / Г. А. Прейс, Н. А. Сологуб, И. А. Рожнецкий [и др.]; под ред. Г. А. Прейса. Киев: Высшая школа, 1984. 359 с.

5. Корягин С. И., Пименов И. В., Худяков В. К. Способы обработки материалов / Калинингр. ун-т. Калининград, 2000. 448 с.

6. Метрология и электрические измерения / Е. Д. Шабалдин [и др.]; под ред. Е. Д. Шабалдина. 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2013. 282 с.

7. Тяговые электрические машины: учебник / В. Г. Щербаков [и др.]; под ред. В. Г. Щербакова, А. Д. Петрушина; Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. М., 2016. 641 с.

8. Методы и средства измерения теплового потока / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.]; под ред. Т. Г. Грищенко; Институт технической теплофизики НАН Украины. Киев, 2017. 438 с.

9. Исследование резонанса в цепи переменного тока. URL: http://www.miem.hse.ru › data › 2018/10/03 (дата обращения: 12.12.2020).

10. Сойбельман Я. С. Асимптотика емкости конденсатора с пластинами произвольной формы // Сибирский математический журнал. 1984. Т. 26, № 6. С. 167–181.

11. Йоссель Ю. Я. Расчет электрической емкости. М.: Энергоиздат, 1981. 288 с.

12. Кононов А. П. Расчёт емкости плоского конденсатора с учетом краевого эффекта // Электромеханика. 1966. № 3. С. 241–243.

13. Гурвиц А., Курант Р. Теория функций. М.: Наука, 1968. 648 с.

14. Шелюто В. А. Ведущая логарифмическая поправка к емкости цилиндрического конденсатора // Журнал технической физики. 1991. Т. 61, вып. 9. С. 178–180.

15. Семахин А. Н. К расчету главной части поправки к конденсаторной емкости между двумя проводниками, разделенными малым зазором // Журнал технической физики. 1990. Т. 60, вып. 10. С. 5–12.

16. Шелюто В. А. Емкость незамкнутого сферического конденсатора и краевые эффекты в электростатических системах с эквидистантными электродами // Журнал технической физики. 1992. Т. 62, вып. 9.

17. Полиа Г., Сеге Г. Изопериметрические неравенства в математической физике. М.: Физматгиз, 1962. 336 с

18. Шелюто В. А. Геометрический фактор и точные решения в системах с цилиндрической симметрией // Журнал технической физики. 1989. Т. 59, вып. 7.

19. Барабанов Г. П., Барабанов В. Г. Автоматизация приёмосдаточных испытаний на герметичность в производстве газовой аппаратуры // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». 2009. № 8. С. 62–65.

20. Гурвич А. К., Ермолов И. Н., Сажин С. Г. Неразрушающий контроль. Контроль проникающими веществами. М.: Высшая школа, 1992.

References

1. Friedman L. B. Mekhanicheskie svoistva metallov [Mechanical properties of metals]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 188 p.

2. Grishchenko T. G., Dekusha L. V., Vorobyov L. I., eds. Teplometriya: teoriya, metrologiya, praktika [Thermometry: theory, metrology, practice]; ed. by T. G. Grishchenko. Kiev, Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2017, book 1. 438 p.

3. Gryadunova E. N., Korndorf S. F., Gorin A. V. Kontrol' germetichnosti izdelii, zapolnennykh predel'nymi uglevodorodami [Control of tightness of products filled with limiting hydrocarbons]. Orel, Gosuniversitet-UNPK Publ., 2015. 86 p.

4. Preis G. A., Sologub N. A., Rozhnetskiy I. A., eds. Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov [Technology of structural materials]; ed. by G. A. Preis. Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1984. 359 p.

5. Koryagin S. I., Pimenov I. V., Khudyakov V. K. Sposoby obrabotki materialov [Methods of processing materials]. Kaliningrad, Kaliningr. un-t Publ., 2000. 448 p.

6. Shabaldin E. D., eds. Metrologiya i elektricheskie [Metrology and electrical measurements]; ed. by E. D. Shabaldin. 2th ed. Yekaterinburg, Publishing House of the Russian State Prof.-Ped. un-ta, 2013. 282 p.

7. Shcherbakov V. G., eds. Tyagovye elektricheskie mashiny [Traction electric machines]; ed. by V. G. Shcherbakov, A. D. Petrushin. Moscow, Educational and Methodological center for Education in railway transport Publ., 2016. 641 p.

8. Grishchenko T. G., Dekusha L. V., Vorobyov L. I., eds. Metody i sredstva izmereniya teplovogo potoka [Methods and means of measuring heat flow]; ed. by T. G. Grishchenko. Kiev, Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2017. 438 p.

9. Issledovanie rezonansa v tsepi peremennogo toka [Research of resonance in an alternating current circuit]. Available at: http://www.miem.hse.ru "data" 2018/10/03. (accessed 12.12.2020)

10. Soibelman J. S. Asimptotika emkosti kondensatora s plastinami proizvol'noi formy [Asymptotics of the capacity of the capacitor with plates of arbitrary shape]. *Sibirskii matematicheskii zhurnal = Siberian Mathematical Journal*, 1984, vol. 26, no. 6, p. 167–181.

11. Yossel Y. Raschet elektricheskoi emkosti [Calculation of capacitance]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 288 p.

12. Kononov A. P. Raschet emkosti ploskogo kondensatora s uchetom kraevogo effekta [Calculation of the capacity of a flat capacitor taking into account the edge effect]. *Elektromekhanika = Elektromekhanika*, 1966, vol. 3, pp. 241–243.

13. Hurvits A., Kurant R. Teoriya funktsii [Theory of Functions]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 648 p.

14. Shelyuto V. A. Vedushchaya logarifmicheskaya popravka k emkosti tsilindricheskogo kondensatora [Leading logarithmic correction to the capacity of a cylindrical capacitor]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 1991, vol. 61, is. 9, pp. 178–180.

15. Semakhin A. N. K raschetu glavnoi chasti popravki k kondensatornoi emkosti mezhdu dvumya provodnikami, razdelennymi malym zazorom [To the calculation of the main part of the correction to the capacitor capacity between two conductors separated by a small gap]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 1990, vol. 60, no. 10, pp. 5–12.

16. Shelyuto V. A. Emkost' nezamknutogo sfericheskogo kondensatora i kraevye effekty v elektrostaticheskikh sistemakh s ekvidistantnymi elektrodami [Capacity of an unclosed spherical capacitor and edge effects in electrostatic systems with equidistant electrodes]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 1992, vol. 62, is. 9.

17. Polia G., Sege G. Izoperimetricheskie neravenstva v matematicheskoi fizike [Isoperimetric inequalities in mathematical physics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 336 p.

18. Shelyuto V. A. Geometricheskii faktor i tochnye resheniya v sistemakh s tsilindricheskoi simmetriei [Geometric factor and exact solutions in systems with cylindrical symmetry]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*, 1989, vol. 59, is. 7.

19. Barabanov G. P., Barabanov V. G. Avtomatizatsiya priemosdatochnykh ispytanii na germetichnost' v proizvodstve gazovoi [Automation of acceptance tests for tightness in the production of gas equipment]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii" = Proceedings of the Volgograd State Technical University. The series "Progressive technologies in mechanical engineering",* 2009, no. 8, pp. 62–65.

20. Gurvich A. K., Ermolov I. N., Sazhin S. G. Nerazrushayushchii kontrol'. Kontrol' pronikayushchimi veshchestvami [Nondestructive control. Control of penetrating substances]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1992.

Информация об авторах / Information about the Authors

Четвериков Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail: dimachetverikov@gmail.com

Гостенков Евгений Викторович, аспирант кафедры приборостроения, метрологии и сертификации, Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация, e-mail:e.gostenkov@proton-electrotex.com

Dmitry A. Chetverikov, Post-Graduate Student of the Department of Instrumentation, Metrology and Certification, Oryol State University named after I. S. Turgenev, Oryol, Russian Federation, e-mail: dimachetverikov@gmail.com

Evgeny V. Gostenkov, Post-Graduate Student of the Department of Instrumentation, Metrology and Certification, Oryol State University named after I. S. Turgenev, Oryol, Russian Federation, e-mail: e.gostenkov@proton-electrotex.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89

Программное обеспечение, предназначенное для оцифровки переходной характеристики, при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте

Р. А. Томакова[1] ✉, А. В. Брежнев[2], Н. А. Корсунский[1], И. С. Егоров[1]

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

[2] Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова
Стремянный пер. 36, г. Москва 117997, Российская Федерация

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Резюме

Цель исследования *заключается в разработке метода формирования дескрипторов, предназначенных для нейросетевых классификаторов медицинских рисков, основанного на анализе переходных процессов в биоматериале в эксперименте in vivo.*

Методы*. Сущность предлагаемого метода состоит в формировании тестовых воздействий зондирующего тока на анатомические области с аномальной электропроводностью и получения амплитудно-фазочастотной характеристики импеданса биоматериала, на который осуществлялось тестовое воздействие. В качестве дескрипторов использовались полученные значения координат графика Коула биоматериала. График Коула получен на основе преобразования Карсона отсчетов переходного процесса в четырехполюснике, элементом которого является импеданс исследуемого биоматериала. На вход четырехполюсника подавалась последовательность однополярных прямоугольных импульсов.*

Результаты. *На основе системы сбора данных E20-10 производства ЗАО «L-Card» разработан программно-аппаратный комплекс для оцифровки переходных процессов в четырехполюсниках, элементом которых является импеданс биоматериала в анатомических областях с аномальной электропроводностью. Разработано программное обеспечение для формирования тестовых воздействий и оцифровки сигналов, являющихся реакцией биоматериала на данные тестовые воздействия. Предложена теоретическая модель перехода от отсчетов переходной характеристики четырехполюсника с элементом импеданса биоматериала к графику Коула биоматериала.*

© Томакова Р. А., Брежнев А. В., Корсунский Н. А., Егоров И. С., 2021

Заключение. *Показано, что линейная модель импеданса биоматериала позволяет получить дескрипторы на основе его амплитудно-фазочастотной характеристики, которые учитывают диссипативные свойства биоматериала. Получение модели графика Коула с учетом его диссипативных свойств позволяет построить классификаторы медицинского риска для социально значимых заболеваний.*

Ключевые слова: *медицинский риск; зоны аномальной электропроводности; биоимпеданс; программно-аппаратный комплекс; переходная характеристика; амплитудно-фазочастотная характеристика.*

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

Финансирование. *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90116.*

Для цитирования: Программное обеспечение, предназначенное для оцифровки переходной характеристики, при проведении биоимпедансных исследований на биологическом объекте / Р. А. Томакова, А. В. Брежнев, Н. А. Корсунский, И. С. Егоров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 50–67.

Поступила в редакцию 15.01.2021 *Подписана в печать 13.02.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Software Designed to Digitize the Transition Characteristic when Conducting Bioimpedance Studies on a Biological Object

Rimma A. Tomakova[1] ✉, Alexey V. Brezhnev[2], Nikita A. Korsunsky[1], Ilya S. Egorov[1]

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

[2] Russian University of Economics name after G. V. Plekhanov
Stremyanny Lane 36, Moscow 117997, Russian Federation

✉ e-mail: rtomakova@mail.ru

Abstract

Purpose of research. *Development of a method for generating descriptors for neural network classifiers of medical risks based on the analysis of transients in biomaterial in an in vivo experiment.*

Methods. *The essence of the proposed method consists in the formation of test effects of the probing current on anatomical areas with abnormal electrical conductivity and obtaining the amplitude-phase-frequency characteristic of the impedance of the biomaterial on which the test effect was carried out. The coordinates of the Cole graph of the biomaterial were used as descriptors. The Cole graph is obtained on the basis of the Carson transformation of the transition process samples in a four-pole array, the element of which is the impedance of the biomaterial under study. A sequence of unipolar rectangular pulses was applied to the input of the quadrupole.*

Results. *On the basis of the E20-10 data collection system manufactured by L-Card, a software and hardware complex has been developed for digitizing transients in four-pole devices, the element of which is the biomaterial impedance in anatomical areas with abnormal electrical conductivity. Software has been developed for the formation of test effects and digitization of signals that are the reaction of the biomaterial to these test effects. A theoretical model of the*

transition from the samples of the transition characteristic of a quadrupole with a biomaterial impedance element to the Cole graph of a biomaterial is proposed.

Conclusion. *It is shown that the linear model of the biomaterial impedance allows us to obtain descriptors based on its amplitude-phase-frequency characteristic, which take into account the dissipative properties of the biomaterial. Obtaining a model of the Cole graph, taking into account its dissipative properties, allows us to build classifiers of medical risk for socially significant diseases.*

Keywords: *medical risk; zones of abnormal electrical conductivity; bioimpedance; software and hardware complex; transient response; amplitude-phase-frequency response.*

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

Funding: *The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90116.*

For citation: Tomakova R. A., Brezhnev A. V., Korsunsky N. A., Egorov I. S. Software Designed to Digitize the Transition Characteristic when Conducting Bioimpedance Studies on a Biological Object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 50–67. (In Russ.)

Received 15.01.2021 *Accepted 13.02.2021* *Published 30.03.2021*

Введение

Любой риск ухудшения здоровья и снижения продолжительности жизни человека является медицинским риском, требующим его оценки. В настоящее время наиболее распространены риски онкологических, сердечно-сосудистых и инфекционных заболеваний [1; 2; 3; 4]. Для своевременной и качественной диагностики медицинского риска необходимо в составе информационной системы использовать подсистемы поддержки принятия решений (ППР). Это обусловлено тем, что диагностика медицинского риска требует одновременного скрининга большой группы населения с целью обнаружения онкологических, сердечно-сосудистых заболеваний, вирусных инфекций [3; 5; 6].

В [7; 8; 9; 10] было показано, что диагностические системы могут быть построены на основе методологии биоимпедансных исследований, базирующихся на изменении значений электропроводности в биоактивных точках (БАТ). Проведенными исследования в [11; 12; 13; 14; 15] выявили воздействия слабыми токами на БАТ.

Наиболее эффективным является метод, основанный на построении графика Коула. Этот метод базируется на представлениях амплитудно-фазочастотной характеристики (АФЧХ) двухполюсника, эквивалентного по импедансу биоматериалу, включенному в цепь источника зондирующего тока [11]. Следует отметить, что при проведении биоимпедансных исследований необходимо соблюдение требований морфологической однородности и интактности

биоматериала. Так как диапазон частот зондирующего тока достаточно велик, а шаг продвижения по этому диапазону должен быть достаточно мал, чтобы учесть диссипативные свойства импеданса биоматериала, то процесс измерения требует длительного времени. Поэтому выполнить вышеперечисленные требования становится проблематично.

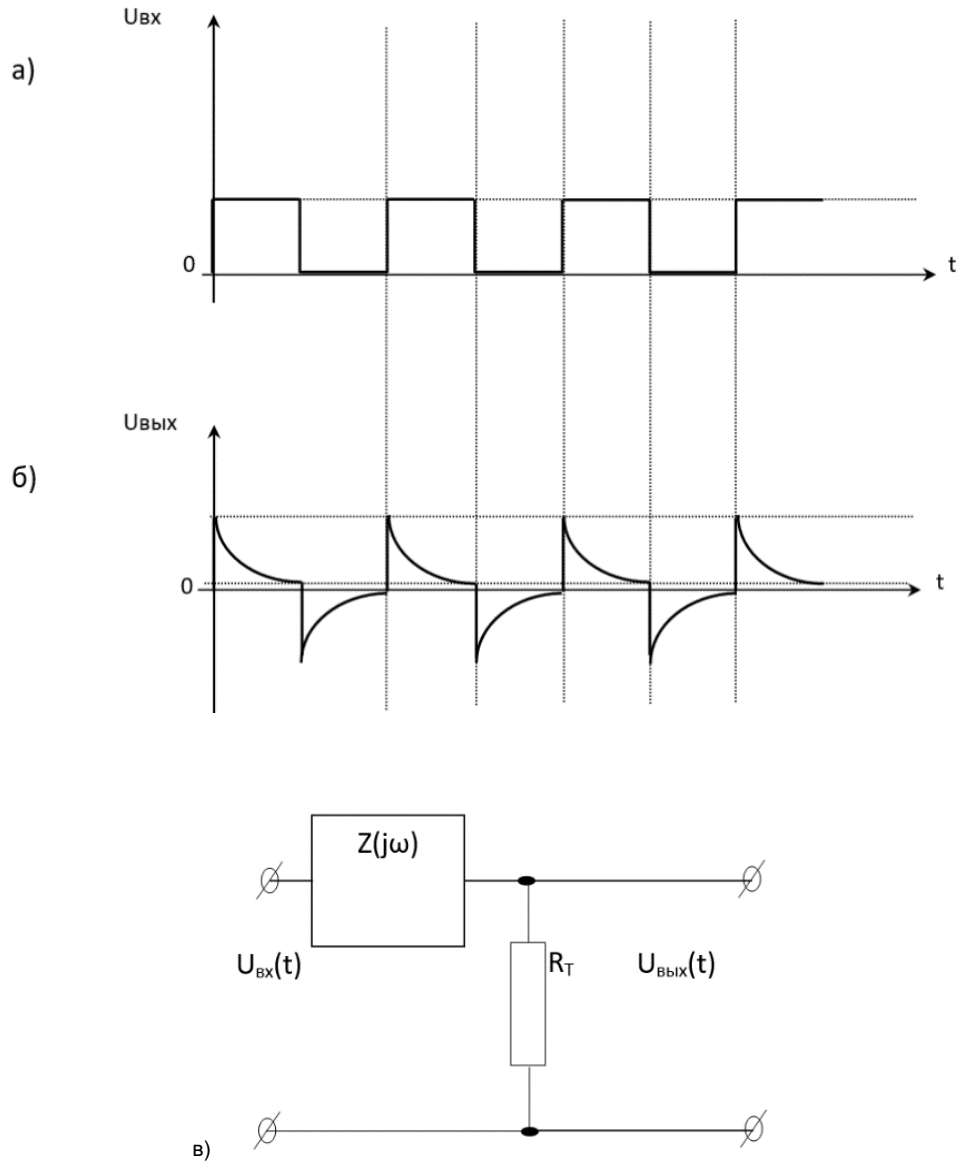


Рис. 1. Последовательность импульсов и схема пассивного четырехполюсника:
а – эпюра входного напряжения; б – эпюра выходного напряжения;
в – схема пассивного четырехполюсника для оцифровки переходной характеристики

Fig. 1. Pulse sequence and circuit of the passive four-pole: a – input voltage plot;
б – output voltage plot; в – passive four-pole circuit for digitizing the transition characteristic

Таким образом, для определения импеданса биоматериала $Z(j\omega)$ необходимо задавать последовательность импульсов rect(t):

$$U_{вх}(t) = \\ = \begin{cases} A, \text{если } (n-1)\cdot T \le t < (\tau + (n-1)\cdot T); \\ 0, \text{если } (\tau + (n-1)\cdot T) \le t < n\cdot T, \end{cases} \quad (1)$$

где A – амплитуда импульса rect(t); τ – длительность импульса rect(t); T – период импульсов rect(t); n – номер импульса rect(t) в последовательности, $n = 1, 2,..., N$.

Эта последовательность импульсов подается на вход пассивного четырехполюсника (рис. 1).

Таким образом, график Коула биоматериала может быть определен по одной переходной характеристики четырехполюсника или по совокупности переходных характеристик с усреднением их по времени или по частоте.

Материалы и методы

Для проведения биоимпедансных исследований на биологическом объекте с учетом проведенного анализа и результатов работ, полученных в [3; 15; 16; 17], был разработан, сконструирован и протестирован программно-аппаратный комплекс (ПАК). Устройства, входящие в разработанный ПАК, и выполняемые им задачи показаны на рисунке 2.

Связь с биообъектом осуществляется с помощью щупа, внешний вид которого представлен на рисунке 3, а, конструктивные особенности щупа показаны на рисунке 3, б. В качестве блока преобразования в ПАК использован модуль быстродействующего АЦП с USB 2.0 интерфейсом – E20-10 производства ЗАО «L-Card» (http://www.lcard.ru), внешний вид блока преобразования приведен на рисунке 3, в.

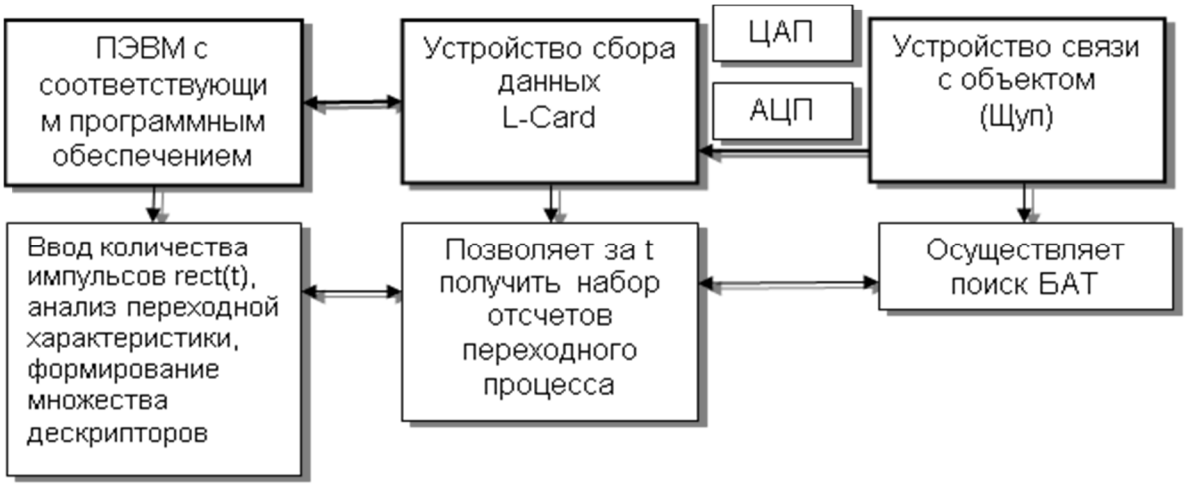
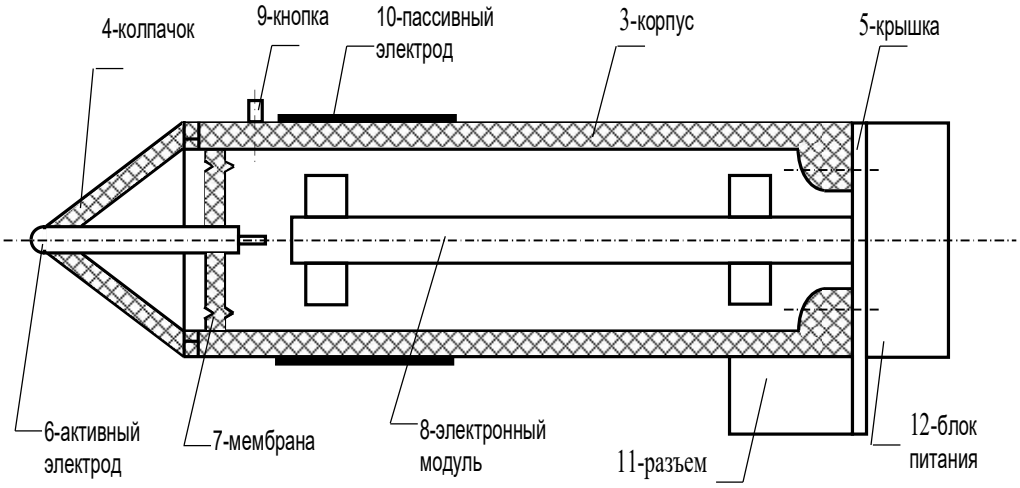


Рис. 2. Структурная схема ПАК

Fig. 2. Block diagram of the PAC

а)



б)

в)

Рис. 3. Аппаратная часть ПАК: а – изображение щупа для снятия показаний, предназначенных для ПАК; б – конструктивные особенности щупа; в – внешний вид модуля E20-10

Fig. 3. The hardware of the PAC: a – the image of the probe for taking readings intended for the PAC; б – the design features of the probe; в – the appearance of the E20-10 module

Следует заметить, что ПАК позволяет не только оцифровать, но и визуализировать процесс переходной характеристики по заданным параметрам.

Результаты и их обсуждение

В качестве среды разработки программного обеспечения для ПАК была

использована RAD Studio XE8 с имеющейся библиотекой L-Card (Lisbari LCome). Выбор этой среды обусловлен доступностью использования готовых приложений для работы с АЦП, ЦАП и возможностью визуализации различных информационных данных с последующим их масштабированием.

Интерфейс основного диалогового окна, открывающегося при запуске программы, представлен на рисунке 4.

Разработанный программный продукт реализует основные функции с помощью четырех модулей, схема взаимодействия которых представлена на рисунке 5.

Первый модуль MainF (рис. 5) является главным модулем программного продукта, который предназначен для организации работы интерфейса с модулем ввода начальных параметров, просмотра данных, полученных в ходе выполнения экспериментов (отображение данных реализуется в виде графиков). Он выполняет передачу управления в другие модули программного продукта, а также осуществляется связь с модулем L-Card.

Функционирование второго модуля DigitalThread (рис. 5) реализует взаимодействие с АЦП и ЦАП.

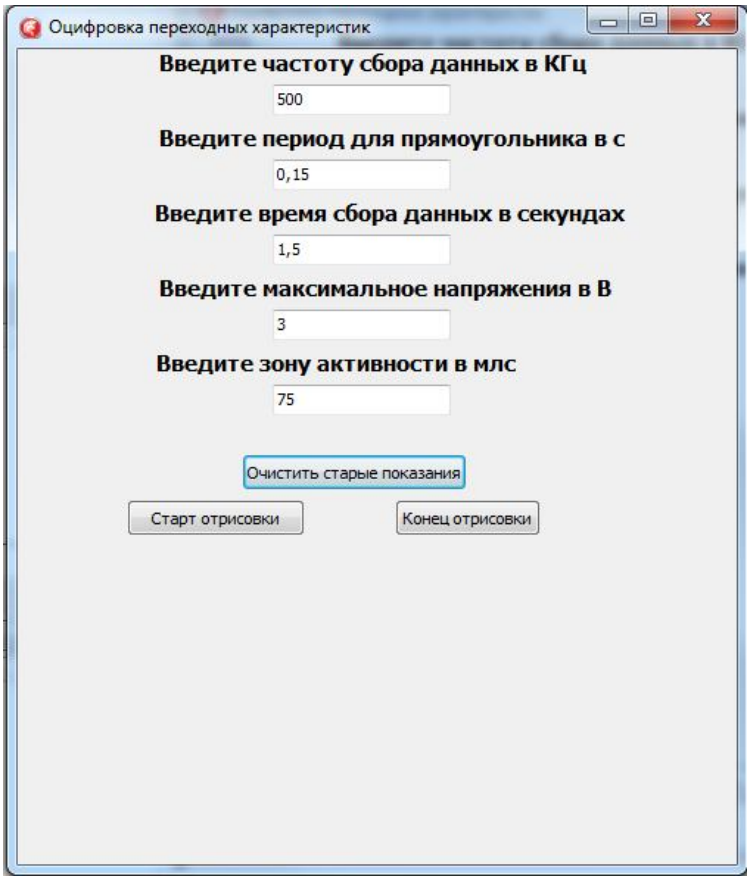


Рис. 4. Интерфейс основного диалогового окна

Fig. 4. The main dialog box of the program: the initial interface that opens at startup

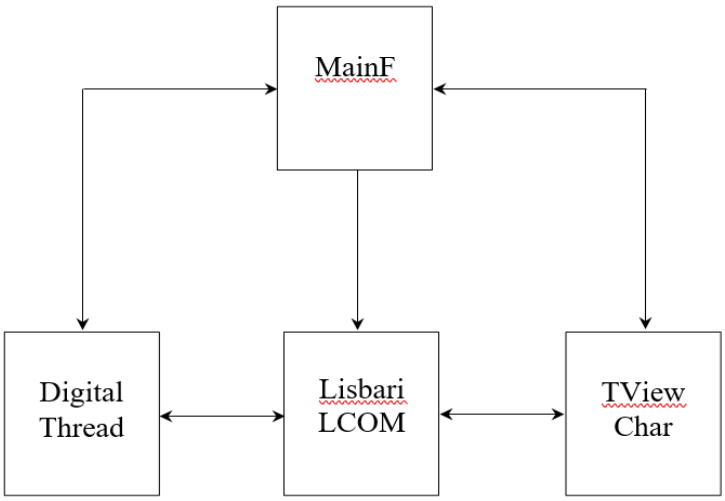


Рис. 5. Схема взаимодействия модулей программного продукта

Fig. 5. Scheme of interaction of software product modules

Программное обеспечение было разработано в среде Delphi RAD Studio XE 8 с использованием библиотек, находящихся в модуле 3 (Lisbari и LCome).

Четвертый модуль TViewChar (рис. 5) предназначен для отображения переходной характеристики.

При моделировании переходных характеристик в БАТ биоматериал представляется эквивалентной схемой пассивного RC-двухполюсника, предложенного Коулом [3; 13; 14]. На рисунке 6 пунктиром выделена схема такого двухполюсника, моделирующего импеданс биоматериала.

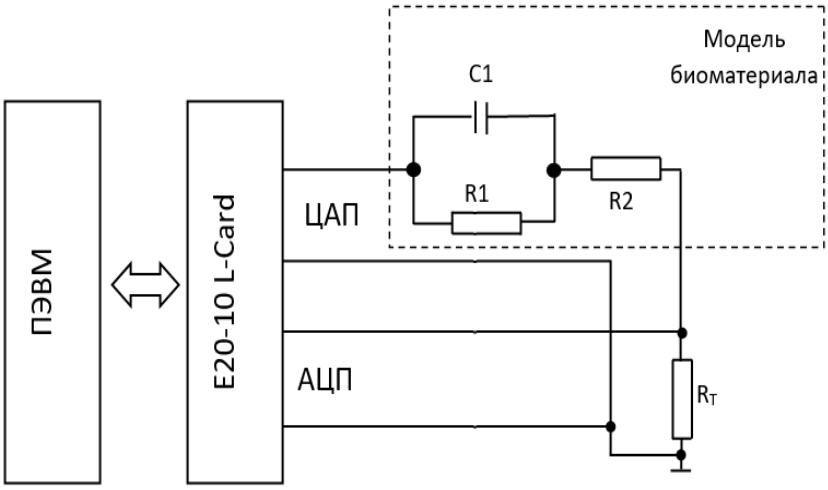


Рис. 6. Функциональная схема устройства для оцифровки переходных характеристик биоматериала

Fig. 6. Functional diagram of a device for digitizing the transient characteristics of a biomaterial

Переходная характеристика – это реакция линейной системы на функцию Хевисайда, является одной из энергетических характеристик БАТ [3]. Операторное сопротивление $Z(s)$ двухполюсника определяется согласно формуле:

$$Z(s)=\frac{R_1+R_2+sR_1R_2C_1}{1+sR_1C_1}, \qquad (2)$$

Импульсы Хевисайда формируются посредством модуля E20-10 и подаются на биоматериал с выхода ЦАП, а переходный процесс наблюдается на резисторе R_T, на котором формируется напряжение, передаваемое в компьютер.

Импеданс биоматериала определяется по закону Ома:

$$Z=\frac{U_{\text{вх}}-U_{\text{вых}}}{I_{R_T}}, \qquad (3)$$

где $U_{\text{вх}}$ – напряжение на входе четырёхполюсника; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе четырёхполюсника; I_{R_T} – ток в резисторе R_T, равный току в биоматериале. Учитывая, что $I_{R_T}=U_{\text{вых}}/R_T$, и полагая, что $ReZ >> R_T$, получим

$$Z=\frac{U_{\text{вх}}(t)}{U_{\text{вых}}(t)}\cdot R_T. \qquad (4)$$

Если на выходе измерительной схемы имеется N дискретных отсчетов $U_{\text{вых}}[n]$ (n = 0, … N–1), то дискретное преобразование Фурье выходного сигнала имеет вид

$$U_{\text{вых}}[m]=\sum_{n=0}^{N-1}U_{\text{вых}}[n]e^{-\frac{j\cdot 2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}}. \qquad (5)$$

В этом случае отсчёты спектральной характеристики четырёхполюсника определяются как

$$S[m]=\frac{j\cdot 2\cdot\pi\cdot m}{M\cdot\Delta t}\sum_{n=0}^{N-1}U_{\text{вых}}[n]e^{-\frac{j\cdot 2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}}, \qquad (6)$$

где $M = N$–1 – число дискретных отсчетов АФЧХ, m = 1…M, Δt – шаг дискретизации $U_{\text{вых}}(t)$.

Для построения графика Коула (АФЧХ) биоматериала необходимо перейти от спектральной характеристики четырёхполюсника к импедансу биоматериала.

$$Z[j\omega]=\frac{R_T}{S(j\omega)}. \qquad (7)$$

Для m-й точки графика Коула выполняется

$$Z[m]=\frac{\Delta t\cdot M\cdot R_T}{2\cdot\pi\cdot m}\times \times\frac{-j}{\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot e^{-\frac{j\cdot 2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}}\right)}. \qquad (8)$$

Импеданс является комплексной величиной и зависит от частоты. Поэтому его характеризуют графиком Коула, который представляет из себя множество точек на комплексной плоскости – координат комплексного вектора Z, каждая из которых соответствует определённой частоте тестового напряжения.

Для построения графика Коула необходимо перейти в систему координат (ReZ, ImZ), заменив экспоненту тригонометрическими функциями Эйлера, по формуле

$$e^{-\frac{j\cdot 2\cdot\pi\cdot n}{N}} = \cos\left(2\cdot\pi\cdot\frac{m\cdot n}{N}\right) - j\cdot\sin\left(2\cdot\pi\cdot\frac{mмn}{N}\right). \quad (9)$$

В итоге (8) представим в виде

$$Z[m] = \frac{\Delta t\cdot M\cdot R_T}{2\cdot\pi\cdot m}\cdot\frac{-j}{\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\cos\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right) - j\cdot\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)}.$$

Умножая на выражение, сопряженное знаменателю, получим

$$Z[m] = \frac{\Delta t\cdot M\cdot R_T}{2\cdot\pi\cdot m}\cdot\frac{-j\cdot\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\cos\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right) + \sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)}{\left(\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\cos\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)\right)^2}.$$

Таким образом, (8) представим в виде двух выражений, отражающих действительную и мнимую части импеданса биоматериала:

$$ReZ[m] = \frac{\frac{\Delta t\cdot M\cdot R_T}{2\cdot\pi\cdot m}\cdot\sum_{n=0}^{N-1}U_{\text{вых}}[n]\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)}{\left(\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\cos\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)\right)^2}, \quad (10)$$

$$ImZ[m] = \frac{-\frac{\Delta t\cdot M\cdot R_T}{2\cdot\pi\cdot m}\cdot\sum_{n=0}^{N-1}U_{\text{вых}}[n]\cdot\cos\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)}{\left(\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\cos\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1}\left(U_{\text{вых}}[n]\cdot\sin\left(\frac{2\cdot\pi\cdot m\cdot n}{N}\right)\right)\right)^2}. \quad (11)$$

Алгоритм построения графика Коула представлен на рисунке 7.

В блоке 1 вводятся параметры оцифровки сигнала переходной характеристики. В блоках 2 и 3 из файла передаются в массив отсчеты переходной характеристики. В блоках 5, 6, 7 вычисляются отсчеты действительной и мнимой частей импеданса биоматериала. В блоках 8 и 9 выполняется калибровка отсчетов импеданса биоматериал по системе частот. В блоках 10 и 11 осуществляется построение графика Коула.

Реализация этого алгоритма позволила получить зависимости значений действительной и мнимой части импеданса биоматериала по системе частот для R_T =1000 Ом, представленные ниже (рис. 8).

Процесс получения данных посредством L-Card для поиска БАТ реализуется на основе алгоритма, представленного на рисунке 9.

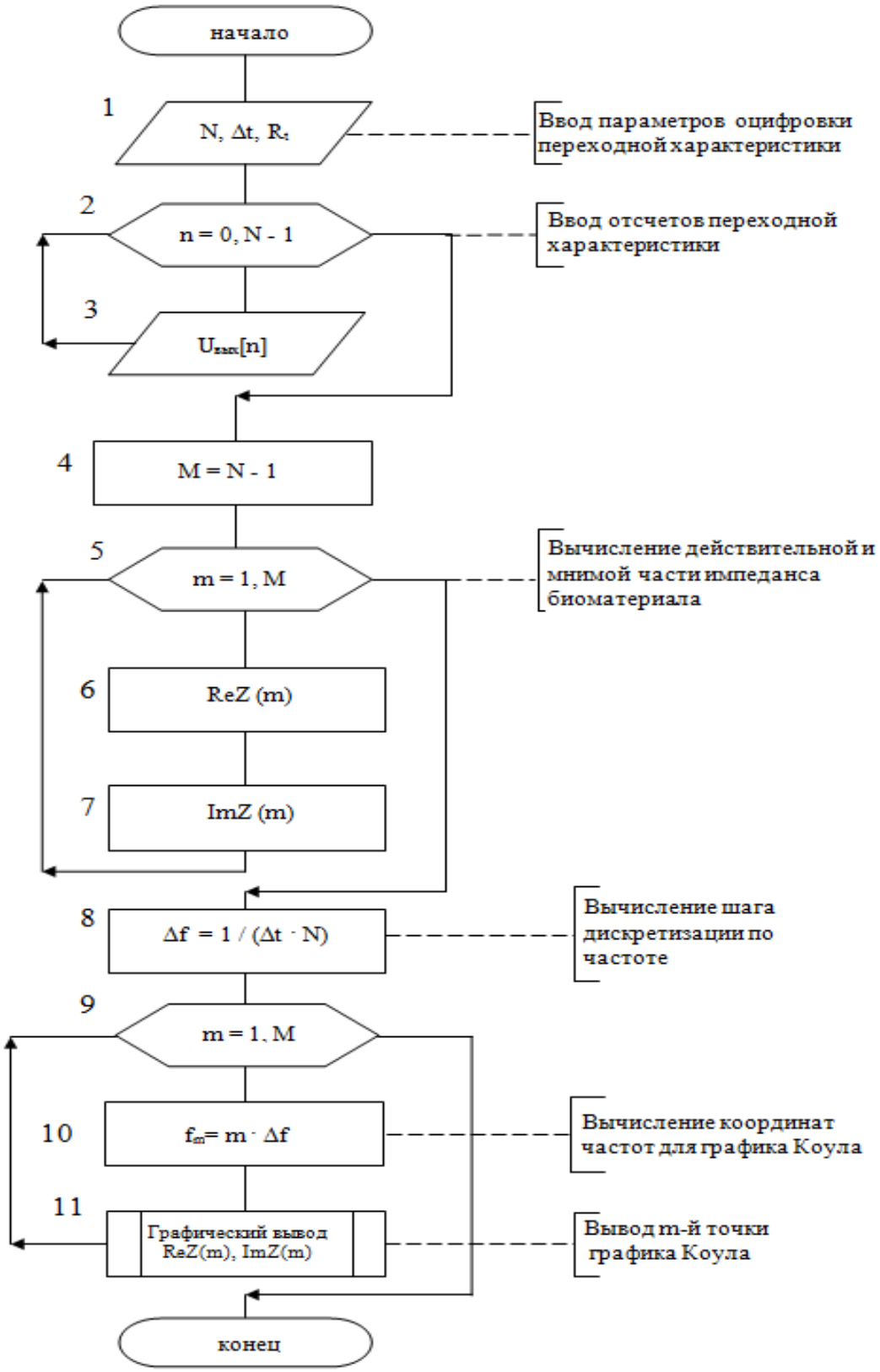


Рис. 7. Схема алгоритма построения графика Коула на основе отсчетов переходной характеристики

Fig. 7. Scheme of the algorithm for constructing the Cole graph based on the samples of the transition characteristic

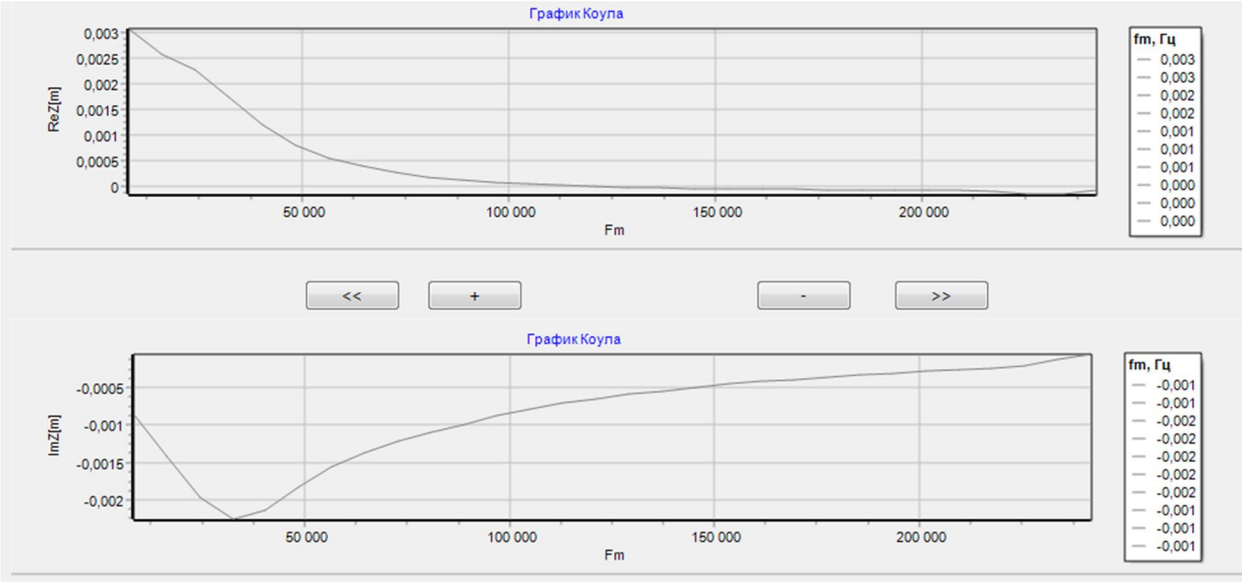


Рис. 8. Зависимости значений действительной и мнимой части импеданса биоматериала от значений частот

Fig. 8. Dependence of the real and imaginary parts of the biomaterial impedance on the frequencies

Рис. 9. Схема алгоритма получения данных посредством L-Card для поиска БАТ

Fig. 9. Scheme of the algorithm for obtaining data by means of an L-Card for searching for BAT

В первом блоке этого алгоритма пользователем задается частота дискретизации Δ, Δϵ[0,15 кГц, 10МГц], размер кадра *T*, который соответствует временному интервалу и определяется как произведение числа отсчетов на величину шага дискретизации. Во втором блоке устанавливается величина постоянного напряжения, воздействующая на биоматериал *U*, *U*ϵ[0, 3,5В], а также начальное и конечное время проведения исследований. Блоки 3, 4 предназначены для формирования графиков силы тока.

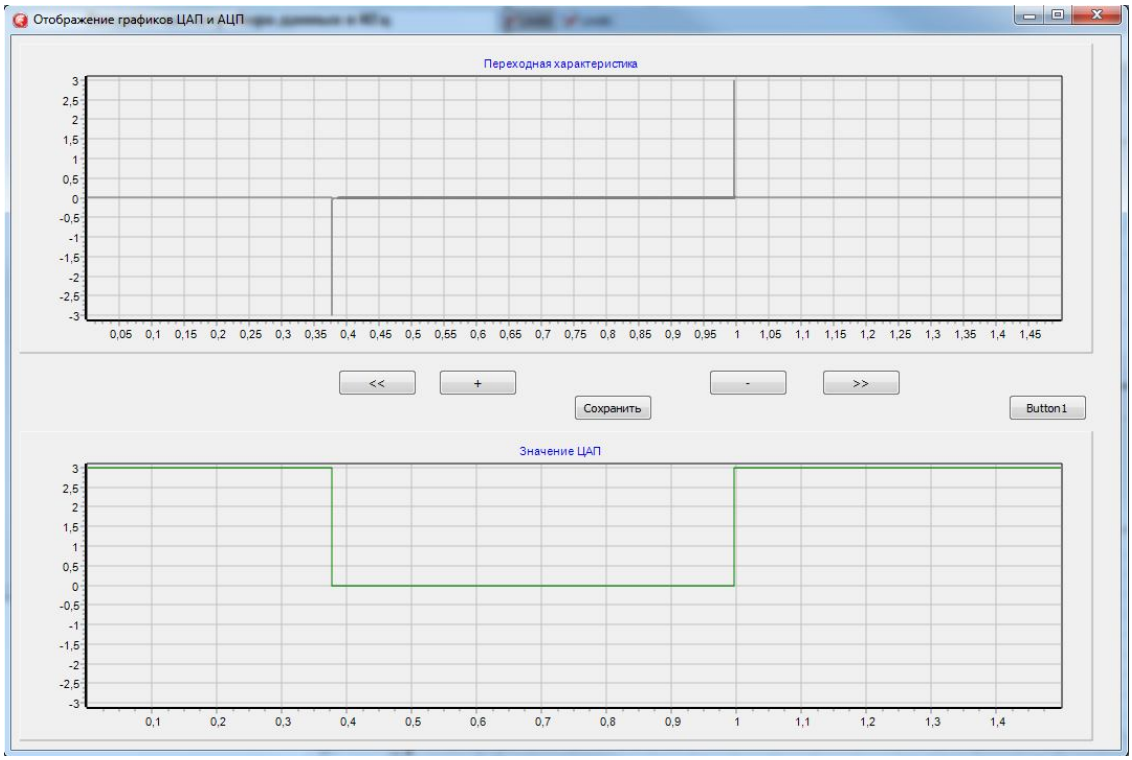


Рис. 10. Интерфейсы программного продукта режима визуализации

Fig. 10. Interfaces of the visualization mode software product

При оцифровке данных получаем два канала: первый соответствует значениям переходной характеристики, а второй – значениям ЦАП (рис. 10).

Выводы

Приведен процесс оцифровки переходной характеристики на биообъекте. Для контроля динамики электрических свойств биоматериала целесообразно использовать вольт-амперные характеристики биоматериала в аномальных зонах электропроводности, получаемые при реверсивно линейно изменяющихся напряжениях.

Достоинства разработанного ПАК состоят в следующем:

– позволяет не только оцифровать, но и визуализировать процесс переходной характеристики по заданным параметрам;

– простота работы с использованием ПАК не требует какого-либо дополнительного обучения;

– масштабирование графиков происходит автоматически, что дает возможность детального просмотра процесса получения переходной характеристики;

– получен метод формирования дескрипторов, который будет использован для нейросетевых классификаторов медицинских рисков, основанный на анализе переходных процессов в биоматериале в эксперименте in vivo.

В перспективе разработанный ПАК предоставит возможность работы с ранее сохраненными файлами, а также будет предусмотрена процедура изменения возможностей визуализации, способствующая детальному изучению переходных характеристик. Немаловажной перспективой развития данного ПАК может являться установление рисков инфекционных заболеваний, что может помочь при первичной диагностики в условиях пандемии.

Данную систему можно использовать в больницах или коммерческих организациях, которые предоставляют медицинские услуги для дополнительной диагностики.

Список литературы

1. Анализ нормы ст. 41 УК РФ об обоснованном риске с точки зрения теоретической обоснованности. URL: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_ obosnovannogo _riska (дата обращения: 11.12.2020).

2. Ростовцев В. Н. Классификация медицинских рисков. URL: http://www.kmsd.su/vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n (дата обращения: 11.12.2021).

3. Шаталова О. В. Интеллектуальные системы мониторинга медицинских рисков с учетом биоимпедансных исследований: монография / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2020. 356 с.

4. Гибридные нечеткие модели для прогнозирования возникновения и осложнений артериальной гипертензии с учетом энергетических характеристик биоактивных точек / М. А. Ефремов, С. А. Филист, О. В. Шаталова, Е. А. Старцев, Л. В. Шульга // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 104–119.

5. Katherine J. Wu. There are more viruses than stars in the universe. URL: https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus (дата обращения: 12.12.2021).

6. Shatalova O. V., Burmaka A. A., Korovin E. N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8501668 (дата обращения: 12.12.2020).

7. Готовский М. Ю., Перов Ю. Ф. Электрохимические процессы на электродах при электропунктурной диагностике. Сообщение 1. Постоянный ток // Традиционная медицина. 2013. № 4(35). С. 4–9.

8. Bioelectrical impedance during hypoxic cell swelling: modeling of tissue as a suspension of cells / F. Seoane, K. Lindecrantz, T. Olsson, I. Kjellmer // Proc. XII Int. Conf. on Electrical Bio-Impedance, June 20–24. Gdansk, 2004. P. 73–76.

9. Кузнецов В. В., Новиков А. А. Техническая реализация биоимпедансной поличастотной спектрометрии в диагностических исследования // Омский научный вестник. 2013. № 2(116). С. 235–240.

10. Диагностические системы на основе анализа вольт-амперных характеристик биоактивных точек / Н. А. Кореневский, С. А. Филист, О. В. Шаталова, К. Д. А. Кассим, В. В. Руденко // Биотехносфера. 2013. № 5 (29). С. 33–38.

11. Филист С. А., Кузьмин А. А., Кузьмина М. Н. Биотехническая система для контроля импеданса биоматериалов в экспериментах in vivo // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 9. С. 38–41.

12. Филист С. А., Шаталова О. В., Богданов А. С. Модели биоимпеданса при нелинейной вольт-амперной характеристике и обратимом пробое диэлектрической составляющей биоматериала // Бюллетень сибирской медицины. 2014. Т. 13, № 4. С. 129–135.

13. Попечителев Е. П., Филист С. А. Способы и модели идентификации биоматериалов на основе анализа многочастотного импеданса // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника. Медицинское приборостроение. 2011. № 1. С. 74–80.

14. Параметрические модели биоимпеданса для идентификации функционального состояния живой системы / К. Д. А. Кассим, И. А. Ключиков, О. В. Шаталова, З. Д. Яа // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 4. С. 50–56.

15. Филист С. А., Суржикова С. Е., Мухатаев Ю. Б. Исследование проводимости биоматериалов в биоактивных точках при циклических воздействиях токами различной полярности // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. Вып. 9. С. 32–36.

16. Томакова Р. А., Насер А. А., Шаталова О. В. Математическое обеспечение распознавания и классификации сложноструктурируемых биологических объектов // Международный журнал прикладных и функдаментальных исследований. 2012. № 4. С. 48–49.

17. Суржикова С. Е., Шаталова О. В., Федянин В. В. Программно-аппаратный комплекс для анализа вольт-амперных характеристик биоактивных точек на основе модуля L-Card E20-10 // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 2(30). С. 150–161.

References

1. Analiz normy st. 41 UK RF ob obosnovannom riske s tochki zreniya teoreti-cheskoi obosnovannosti [Analysis of the norm of Article 41 of the Criminal Code of the Russian Federation on reasonable risk from the point of view of theoretical validity]. Available at: http://studbooks.net/1116912/pravo/meditsinskiy_risk_obosnovannogo_riska. (accessed 11.12.2020)

2. Rostovtsev V. N. Klassifikatsiya meditsinskikh riskov [Classification of medical risks]. Available at: http://www.kmsd.su/ vracham/nauchnye-stati/klassifikatsiya-meditsinskikh-riskov-rostovtsev-v-n. (accessed 11.12.2021)

3. Shatalova O. V. Intellektual'nye sistemy monitoringa meditsinskikh ris-kov s uchetom bioimpedansnykh issledovanii [Intellectual systems for monitoring medical risks taking into account bioimpedance studies]. Kursk, Southwest State University Publ., 2020. 356 p.

4. Efremov M. A., Filist S. A., Shatalova O. V., Startsev E. A., Shulga L. V. Intellektual'nye sistemy monitoringa meditsinskikh ris-kov s uchetom bioimpedansnykh issledovanii: monografiya [Hybrid fuzzy models for predicting the occurrence and complications of arterial hypertension taking into account the energy characteristics of bioactive points]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 104–119.

5. Catherine J. There are more viruses in the universe than there are stars. Available at: https://www.nationalgeographic.com/science/2020/04/factors-allow-viruses-infect-humans-coronavirus. (accessed 12.12.2021)

6. Shatalova O. V., Burmaka A. A., Korovin E. N. Impedance models in anomalous electrical conduction zones forming by in-vivo experiments for intelligent systems of socially important diseases diagnostic. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8501668. (accessed 11.12.2020)

7. Gotovsky M. Yu., Perov Yu. F. Elektrokhimicheskie protsessy na elektrodakh pri elektropunkturnoi diagnostike. Soobshchenie 1. Postoyannyi tok [Electrochemical processes on electrodes at electropuncture diagnostics. Message 1. Direct current]. *Traditsionnaya meditsina = Traditional Medicine*, 2013, no. 4 (35), pp. 4–9.

8. Seoane F., Lindecrantz K., Olsson T., Kjellmer I. [Bioelectric impedance during hypoxic cell swelling: modeling of tissue asa suspension of cells]. Proc. XII Int. Conf. on Electrical Bio-Impedance, June 20–24. Gdansk, 2004, pp. 73–76.

9. Kuznetsov V. V., Novikov A. A. Tekhnicheskaya realizatsiya bioimpedansnoi po-lichastotnoi spektrometrii v diagnosticheskikh issledovaniya [Technical implementation of bioimpedance poly-frequency spectrometry in diagnostic studies]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2(116), pp. 235–240.

10. Korenevsky N. A., Filist S. A., Shatalova O. V., Kassim K. D. A., Rudenko V. V. Diagnosticheskie sistemy na osnove analiza vol'tampernykh kharakteristik bioaktivnykh tochek [Diagnostic systems based on the analysis of current-voltage characteristics of bioactive points]. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*, 2013, no. 5 (29), no. 33–38.

11. Filist S. A., Kuzmin A. A., Kuzmina M. N. Biotekhnicheskaya sistema dlya kontrolya impedansa biomaterialov v ekspe-rimentakh in vivo [Biotechnical system for controlling the impedance of biomaterials in experiments in vivo]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2014, no. 9, pp. 38–41.

12. Filist S. A., Shatalova O. V., Bogdanov A. S. Modeli bioimpedansa pri nelineinoi vol'tampernoi kharakteristike i obratimom proboe dielektricheskoi sostavlyayushchei biomateriala [Models of bioimpedance at nonlinear current-voltage characteristic and reversible breakdown of the dielectric component of biomaterial]. *Byulleten' sibirskoi meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*, 2014, vol. 13, no. 4, pp. 129–135.

13. Opredelitelev E. P., Filist S. A. Sposoby i modeli identifikatsii bioma-terialov na osnove analiza mnogochastotnogo impedansa [Methods and models for identifying biomaterials based on the analysis of multi-frequency impedance]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation,* 2011, no. 1, pp. 74–80.

14. Kassim K. D. A., I Klyuchikov. A., Shatalova O. V., Yaa Z. D. Parametricheskie modeli bioimpedansa dlya identifikatsii funktsional'-nogo sostoyaniya zhivoi sistemy [Parametric models of bioimpedance for the identification of the functional state of a living system]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2012, no. 4, pp. 50–56.

15. Filist S. A., Surzhikova S. E., Muchataev Yu. B. ssledovanie provodimosti biomaterialov v bioaktivnykh tochkakh pri tsiklicheskikh vozdeistviyakh tokami razlichnoi polyarnosti [Investigation of the conductivity of biomaterials in bioactive points under cyclic effects of currents of different polarities]. *Biomeditsinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics*, 2016, is. 9, pp. 32–36.

16. Tomakova, R. A., Naser A. A., Shatalova O. V. Matematicheskoe obespechenie raspoznavaniya i klassifikatsii slozhnostrukturiruemykh biologicheskikh ob"ektov [Mathematical support for recognition and classification of complexly structured biological objects].

Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i funkdamental'nykh issledovanii = International Journal of Applied and Fundamental Research, 2012, no. 4, pp. 48–49.

17. Surzhikova S. E., Shatalova O. V., Fedyanin V. V. Programmno-apparatnyi kompleks dlya analiza vol'tampernykh kharakteristik bioaktivnykh tochek na osnove modulya L-Card E20-10 [Software and hardware complex for analyzing the current-voltage characteristics of bioactive points based on the L-Card E20-10 module]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2015, no. 2(30), pp. 150–161.

Информация об авторе / Information about the Author

Томакова Римма Александровна, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: rtomakova@mail.ru

Rimma A. Tomakova, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: rtomakova@mail.ru

Брежнев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: brezhnev.av@rea.ru

Alexey V. Brezhnev, Cand. of Sci. (Engeneering), Associate Professor, Russian University of Economics name after G. V. Plekhanov,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: brezhnev.av@rea.ru

Корсунский Никита Александрович, магистрант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru

Nikita A. Korsunsky, Undergraduate, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: cor.nick2013@yandex.ru

Егоров Илья Сергеевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: egorov.ilia1996@mail.ru

Ilya S. Egorov, Post-Graduate Student, Southwest State University,
Kursk, Russian Federation,
e-mail: egorov.ilia1996@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.4:624.07

Цифровая интеграция людей с ограниченными возможностями

А. С. Кузнецова[1] ✉, В. В. Гилка[1], Ю. А. Качанов[1], А. В. Чумаков[1], Окороджи Дюк Филип Чике[1]

[1] Волгоградский государственный технический университет
пр. В. И. Ленина 28, г. Волгоград 400005, Российская Федерация

✉ e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Резюме

Цель исследования *– повышение качества адаптации электронных ресурсов для людей с ограниченными возможностями, собранных в одном программном обеспечении. В повседневной жизни люди с ограниченными возможностями здоровья сталкиваются с рядом проблем, сущность которых заключается в коммуникативных, психологических особенностях при взаимодействии с окружающей средой, в доступности необходимых физических объектов, среды (жилье, транспорт). Большая часть данных проблем возникает из-за социальных барьеров между людьми с ограниченными возможностями здоровья и социумом.*

Методы. *Рассмотрены методы распознавания статьи на сайтах, выявлены их области применения, преимущества и недостатки, а также извлечение информации с интернет-ресурсов с помощью Ruby.*

Результаты. *Для решения поставленной в статье проблемы было решено реализовать интернет-браузер с функцией «режим чтения», которая позволяет распознавать на сайте заголовок статьи, тело статьи, выделять их, таким образом, избавляясь от лишнего контента на странице, для комфортного чтения и навигации. Также данная программа позволяет предоставлять текстовый контент в альтернативной форме – голосовой форме.*

Заключение. *В данной работе приводится системный анализ проблем коммуникаций людей с ограниченными возможностями здоровья, системный анализ проблем, возможностей их решения. Рассмотрены федеральные и мировые законопроекты для улучшения качества жизни для людей с ограниченными возможностями здоровья. Также рассмотрена классификация нозологических групп людей с ОВЗ и распределение информационных технологий, облегчающие использование компьютером для каждой нозологической группы.*

Ключевые слова: *информационные технологии; образовательные проблемы; информационные и коммуникационные технологии; инклюзивное образование.*

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

Для цитирования: Цифровая интеграция людей с ограниченными возможностями / А. С. Кузнецова, В. В. Гилка, Ю. А. Качанов, А. В. Чумаков, Окороджи Дюк Филип Чике // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 68–81.

Поступила в редакцию 18.01.2021 *Подписана в печать 16.02.2021* *Опубликована 30.03.2021*

© Кузнецова А. С., Гилка В. В., Качанов Ю. А., Чумаков А. В., Окороджи Дюк Филип Чике, 2021

Digital Integration of People with Disabilities

Agnessa S. Kuznetsova [1] ✉, Vadim V. Gilka [1], Yurii A. Kachanov [1], Artem V. Chumakov [1], Okoroji Duke Philip Chike[1]

[1] Volgograd State Technical University
28 V. I. Lenina aven., Volgograd 400005, Russian Federation

✉ e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Abstract

The purpose of reseach *is to improve the quality of adaptation of electronic resources for people with disabilities, collected in one software. In everyday life, people with disabilities face a number of problems, the essence of which is the communicative, psychological features in interacting with the environment, the availability of necessary physical objects, the environment (housing, transport). Most of these problems arise from social barriers between people with disabilities and society.*

Methods. *Methods of article recognition on websites are considered, areas of application, advantages and disadvantages, as well as extraction of information from internet resources using Ruby.*

Results. *To solve the problem stated in the article, it was decided to implement an internet browser with "reading mode" function, which allows to recognize the title of the article on the site, the body of the article, highlight them, thereby getting rid of unnecessary content on the page, for comfortable reading and navigation. This program also allows you to provide text content in an alternative form – voice form.*

Conclusion. *This paper provides systematic analysis of the communication problems of people with disabilities, systematic analysis of the problems, possibilities of their solutions. Federal and international draft laws for improving the quality of life for people with disabilities are considered. The classification of nosological groups of people with disabilities and the distribution of information technologies that facilitate the use of computers for each nosological group are also considered.*

Keywords: *information technologies; educational problems; information and communication technologies; inclusive education.*

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

For citation: Kuznetsova A. S., Gilka V. V., Kachanov Y. A., Chumakov A. V., Okoroji Duke Philip Chike. Digital Integration of People with Disabilities. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 68–81. (In Russ.)

Received 18.01.2021 *Accepted 16.02.2021* *Published 30.03.2021*

Введение

По данным ВОЗ, более миллиарда человек живут с инвалидностью – люди с ограниченными возможностями, для которых социальная интеграция является скорее стремлением, чем обеспеченным состоянием. Они живут в обществе, предназначенном для большинства людей, не имеющих инвалидности, и встречаются с высоким риском общественной изоляции, так как у них отсутствует равный доступ к здравоохране-

нию, образованию и возможностям трудоустройства, они не получают услуг, сопряженных не только с инвалидностью, но и с обычной жизнью среднестатистического человека.

В повседневной жизни люди с ограниченными возможностями здоровья сталкиваются с рядом проблем, сущность которых заключается в коммуникативных, психологических особенностях при взаимодействии с окружающей средой, в доступности необходимых физических объектов, среды (жилье, транспорт). Большая часть данных проблем возникает из-за социальных барьеров между людьми с ОВЗ и социумом. Кроме того, они часто живут в семьях с низким доходом, и проблемы мобильности и доступности, с которыми они часто сталкиваются, уменьшают их участие в общественной деятельности.

Материалы и методы

Использование информационных технологий широко признано повседневной частью жизни многих людей и имеет влияние на многие аспекты жизни общества, включая образование, профессиональную подготовку и занятость, экономическое процветание людей и стран, а также в СМИ, туризме и досуге[1]. Значительные усилия и инвестиции были вложены в максимальное использование преимуществ информационных технологий в образовании и обучении в развитых и развивающихся странах [1].

Разработка этих информационных технологий являются особенно ценным инструментом для людей с ограниченными возможностями, они могут улучшить их качество жизни. Несмотря на то, что все еще существует признанный цифровой разрыв, теперь он намного меньше.

Специальное образование охватывает множество разнообразных образовательных проблем и может охватывать людей любого возраста[2]. Некоторым молодым людям требуется поддержка для того, чтобы иметь возможность достигнуть базового уровня общения с окружающими людьми [2; 3; 4; 5].

Физическая недоступность образовательной, рабочей, информационной и социальной среды была одним из основных факторов маргинализации людей с ограниченными возможностями. Все: от возможности поехать и войти в школу или на работу, восприятия и понимания того, что написано на доске, слушания,

[1] Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 13 декабря 2006 г. URL: https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N06/500/81/PDF/N0650081.pdf?OpenElement (дата обращения: 01.12.2020); Государственная программа Российской Федерации «Доступная среда». URL: https://-mintrud.gov.ru-/ministry/programms/3/0 (дата обращения: 02.12.2020).

[2] О ратификации Конвенции о правах инвалидов: федер. закон от 03.05.2012 г. № 46-ФЗ. URL: http://kremlin.ru/events/ president/news /15196 (дата обращения: 02.12.2020).

понимания и общения с учителями, менеджерами, клиентами и коллегами, доступа к бумажным и печатным материалам и отдыха, а социализация может стать препятствием. Учитывая это состояние изоляции, растет интерес к тому, могут ли цифровые технологии, инструменты и услуги повлиять на социальную интеграцию и благосостояние людей, живущих с инвалидностью[1], и каким образом [6; 7; 8; 9].

Эмпирические исследования по развитию вспомогательных технологий и связанных с ними платформами начали расти в последние пару десятилетий. В целом утверждалось, что информационные и коммуникационные технологии (ИКТ) предлагают инвалидам возможность компенсировать физические или функциональные ограничения за счет расширения объема доступных им видов деятельности. Некоторые из этих мероприятий могут включать лучший доступ к здравоохранению и более качественное образование, а также расширенные возможности для гражданского участия и расширение присутствия на рынке труда.

Для информационных технологий в инклюзивном образовании отведены три главные роли:

1. Компенсаторная – техническая помощь для облегчения традиционных для образования видов деятельности – чтения и письма.

2. Дидактическая – процесс использования информационных технологий в целом и изменение в связи с этим подходов к обучению. Существует много возможностей использования информационных технологий в качестве дидактического инструмента для создания подходящей учебной среды.

3. Коммуникационная (для коммуникационных технологий) – часто относящаяся к использованию систем поддерживающей альтернативной коммуникации. Основными типами средств информационных технологий, используемых для обучения инвалидов и способных выполнять указанные функции, являются следующие:

– стандартные технологии (например, компьютеры, имеющие встроенные функции настройки для лиц ОВЗ);

– доступные форматы данных, известные так же, как альтернативные форматы (например, доступный HTML, говорящие книги системы DAISY (Digital Accessibility Information System – электронная доступная информационная система), а также «низкотехнологичные» форматы, такие как система Брайля);

– вспомогательные технологии (слуховые аппараты, устройства для чтения

[1] Орлова Ю. А. Модели и методы информационной поддержки коммуникации людей с ограниченными возможностями: автореф. дис. … д-ра техн. наук / Белгородский государственный национально-исследовательский университет. Белгород, 2016. 36 с.

с экрана, клавиатуры со специальными возможностями и т. д.).

Вспомогательные технологии (ВТ) – это «устройства, продукты, оборудование, программное обеспечение или услуги, направленные на усиление, поддержку или улучшение функциональных возможностей людей с ограниченными возможностями здоровья»[1].

Специальные школы, финансируемые государством, продолжают существовать, но влияние философии и практики (инклюзивная система образования) и ее интеграция в образовании сделали поддержку студентов с особыми потребностями проблемой растущего числа учителей (преподавателей), школ, колледжей и вузов [10; 11].

Обязательства этих групп, однако, на самом деле оказываются разочарованием, возникающим из-за нехватки соответствующих ресурсов ограниченным количеством сотрудников, прошедших необходимую подготовку для работы с людьми ОВЗ, обучение персонала и его компетентность в контексте особых потребностей – проблема, стоящая перед среднем и высшим образованием.

Многие школьники и студенты оказываются в образовательной среде, где учителям трудно оказать им индивидуальную поддержку, в которой они часто нуждаются. Их собственные нарушения ограничивают их участие, часто без компенсационных вмешательств или аксессуаров, которые помогли бы им, отсутствие достижений в учебе, а также низкая самооценка порождают полную противоположность интегративному подходу – образовательная и социальная изоляция. Пытаясь решить такие проблемы, школы, колледжи и вузы часто манипулируют своими ресурсами для оказания специализированной педагогической поддержки в виде дополнительных занятий. Однако даже из самых лучших побуждений многие такие уловки только подчеркивают проблемы студентов и в конечном итоге противоречат их стремлению соответствовать своим сверстникам [12; 13; 14; 15].

Школы, колледжи, вузы ищут панацею – это либо преподавательский состав, который сможет успешно освоить все специальные потребности в обычных классах, или средства, с помощью которых учащиеся с особыми потребностями могут успешно компенсировать свои собственные нарушения без клейма абстиненции и значительно сниженное восприятие уникальности.

Цифровая интеграция инвалидов и то, как она связана с их социальной ин-

[1] Методические рекомендации по организации образовательного процесса для обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в образовательных организациях высшего образования, в том числе оснащенности образовательного процесса. URL: https://www.mgpu.ru/materials/47/47958.doc (дата обращения: 04.12.2020).

теграцией, далеко не просты или одномерны. В частности, она исследует степень, в которой разнообразие лиц с ограниченными возможностями преобладает в цифровой сфере, и раскрывает роль, которую индивидуальность и избирательность играют в выборе, который делают инвалиды в отношении цифровых технологий, и в воспринимаемом или переживаемом влиянии этих технологий на их социальную интеграцию [16; 17; 18; 19].

Результаты и их обсуждение

В последние три десятилетия исследователи все больше осознают не только существование множественного и сложного неравенства в доступе к цифровым технологиям, их использовании и выгодах, но и то, что цифровая интеграция различается по широте и глубине и включает в себя развивающиеся градации. Это побудило исследователей предложить различные типологии приверженцев цифровых технологий и тех, кто их не придерживается.

Отношения между «цифровым» и «социальным» еще более сложны, когда речь идет о социально маргинализированных группах населения, таких как люди с одной или несколькими инвалидностями. С 2000-х годов вопрос о социальной интеграции инвалидов все чаще находит отражение в исследованиях по цифровой интеграции, которые обращают внимание на корреляцию между социальной интеграцией инвалидов их цифровой вовлеченностью.

В частности, исследования продемонстрировали преимущества цифровой коммуникации для деятельности инвалидов, такой как: поиск информации; образование; поддержка здоровья; социальное взаимодействие; поиск работы; самоопределение; самоадвокация; развитие независимости; и выражение идентичности для снижения стигмы. Это привело к многочисленным призывам к постоянной поддержке и финансированию экосистемы вспомогательных технологий, которая улучшит жизнь людей с инвалидностью в сообществе, преобразует дневные услуги, поддерживает их в работе и их собственных домах, а также предоставляет сетевые услуги первичной медико-санитарной помощи и инвалидности. Исследования предложили поддерживающие меры, чтобы позволить инвалидам использовать технологии вспомогательного проживания, и учли их связанные с ними мотивации и потребности во взаимодействии.

Что касается барьеров на пути к цифровой интеграции инвалидов, то они в основном объясняются низкой грамотностью и технологическими навыками, безработицей, низким доходом, барьерами доступности, ограниченной доступной поддержкой, киберэтикетом и связанными с этим недостатками политики. В частности, доступность по цене была давней проблемой из-за того, что инвалиды часто относились к категории лиц с низким доходом, что превращало

приобретение дорогостоящих вспомогательных технологий в тупик. Некоторые исследования проводились с точки зрения дизайна, представляя сложность устройства, хаос пользовательского интерфейса и реактивный дизайн вспомогательных устройств, технологии как заметные дизайнерские барьеры на пути к цифровой интеграции инвалидов.

Число студентов-инвалидов во всем мире стремительно растет, но многие школы и университеты не справляются с их потребностями в обучении. Следовательно, большое количество студентов-инвалидов бросают школу или университет. Открытые образовательные ресурсы содержат несколько важных функций, включая возможность повторного использования и ремикширования.

Образование является ключевым вопросом Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года, поскольку оно напрямую связано с 17 целями повестки дня и лежит в основе цели 4 в области устойчивого развития (ЦУР 4), которая направлена на обеспечение инклюзивного и справедливого качественного образования и содействие обучению на протяжении всей жизни. Одной из целей ЦУР 4 является равенство, которое определяется ее целью: «К 2030 году ликвидировать гендерное неравенство в образовании и обеспечить равный доступ ко всем уровням образования и профессиональной подготовки для уязвимых, включая инвалидов, коренные народы и детей в уязвимых ситуации». Это особенно актуально, поскольку, по последним данным, 15% населения мира – более миллиарда человек – живут с той или иной формой инвалидности.

Согласно Всемирной организации здравоохранения, инвалидность покрывает нарушения, ограничения активности и ограничения участия. Нарушение – это проблема функции или структуры тела; ограничение активности – это трудность, с которой сталкивается человек при выполнении задачи или действия; в то время как ограничение участия – это проблема, с которой сталкивается человек при вовлечении в жизненные ситуации.

В образовательном контексте доступность для учащихся с ограниченными возможностями означает, что для того, чтобы все могли иметь равный опыт обучения, опыт обучения, включая его содержание обучения и учебный процесс, должен быть скорректирован в соответствии с потребностями учащихся, включая их инвалидность. Хотя люди с ограниченными возможностями имеют такие же образовательные потребности, как и другие люди, они с меньшей вероятностью будут посещать школы и получить высшее образование и, следовательно, могут столкнуться с трудностями при поиске работы в будущем.

Классификация веб-порталов на основе латентно-семантического анализа

Большую часть информации на интернет-порталах составляют неструктурированные данные – именно те данные, с которыми взаимодействуют пользователи. Как решение данной проблемы существуют порталы, программы, которые классифицируют представленную информацию и автоматически группируют данные, составляя аннотацию данных статей. Яркий пример – новостной портал «Яндекс.Новости».

Хорошими входными данными для латентно-семантического анализа являются новостные порталы, которые по структуре не сильно отличаются от образовательных порталов. Статья имеет следующую структуру: заголовок содержит тему статьи, состоит из одного небольшого предложения, основная информация включает в себя главную тему (раскрывается в первых двух абзацах).

Для решения данной задачи следует построить тематическую модель. Тематическая модель описывает принадлежность документа к некоторой теме.

С математической точки зрения задача сводится и параллельной классификации ряда документов по одинаковому множеству тем.

При построении заданной модели формализуются некоторые обозначения и предположения.

Обозначим за D набор документов, которые содержат в себе множество документов d, причем n является количеством нужных документов в наборе:

$$D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}, \quad (1)$$

где D – набор документов; d – множество документов; n – количество нужных документов.

Каждый документ d содержит в себе некоторое множество слов W_d:

$$W_d = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_d\}, \quad (2)$$

где d – подмножество документов; W_d – множество слов.

Также документы d имеют заданную тему t, которая включена в подмножество тем T:

$$T = \{t, t_2, t_3, \dots, t_n\}, \quad (3)$$

где d – подмножество документов; t – подмножество тем.

Матрица будет являться тематической моделью:

$$\Phi = \|p(w|t)\|\Phi = \|p(w|t)\|, \quad (4)$$

где Φ – значение матрицы; p – распределение документов; w – множество слов; t – тема.

Извлечение информации с интернет-ресурсов с помощью Ruby

Интернет-ресурсы не ограничиваются обслуживанием реальных пользователей. Многие популярные веб-сайты поддерживают API-интерфейс, с помощью которого происходит взаимодействие компьютерной программы с сайтом, например, для сбора некоторой информации, статистики.

Веб-скрейпинг (screen scraping) – это технология, с помощью которой происходит преобразование HTML-страниц на синтаксическом уровне, в более удобные формы для потребления. При помощи API-интерфейсов можно получать структурированную информацию интернет-контента.

Наиболее распространенными являются несколько подходов для веб-скрейпинга. Некоторые из данных подходов преобразуют HTML-формат в формат JSON, значительно упрощая получение данных со страницы. Некоторые решения позволяют определить представленный контент как HTML-иерархию со структурированными данными. Решение Nokoqiri позволяет парсить HTML-документ и XML-документы с использованием языка Ruby. Решение pjscrape используется для JavaScript и основано на работу с командной строкой. Данное решение может анализировать полученную веб-страницу, включая JavaScript-код данной страницы. Решение Beautiful Soup используется для Python и хорошо интегрируется со средой Python.

Допустим, что требуется с использованием инструмента Nokogiri использовать веб-скрейпинг для определения некоторого показателя из базы данных, который отражен на HTML-странице. Данные расположены внутри HTML тега с определенным ID для тега. В данном методе будет запрошен тег и после возвращен полученный контент из обработанной ссылки.

CrunchBase предоставляет REST API-интерфейс, с помощью которого происходит доступ к большему количеству необходимых данных, нежели предыдущий инструмент. В данном методе определяется запрашиваемый URL, после используется GET-запрос из HTTP-класса для получения ответа. Полученный ответ анализируется в форме объекта JSON, обращение непосредственно к элементу происходит с помощью структуры данных языка Ruby.

При использовании API-интерфейса в каждом случае есть свои преимущества. При работе скрейпинга можно не углубляться в код HTML для получения структуры и выделения данных для обработки. С использованием технологии Nokogiri достаточно просто обнаружить в структуре необходимые данные. Но в том случае, когда будет изменена структура HTML-кода, может потребоваться существенная модификация скрипта с целью адаптации для парсинга новой структуры документа. Подход на основе работы с API-интерфейсом хорошо работает до тех пор, пока существенен и хорошо прослеживается контраст API-интерфейса.

Другим важный преимуществом данного подхода является то, что основа интерфейса позволяет обратиться ко всем данным, доступ к котором предоставляется через интерфейс, посредством JSON-объекта, который возвращается после запроса. Объем данных, который веб-сайт предоставляет через HTML, гораздо меньше.

Выводы

Доступные технологии играют важную роль в вовлечении студентов с ограниченными возможностями, как в образовательном, так и в социальном плане, посредством принятия инвалидности и обеспечения того, чтобы студенты не остались в стороне и не остались позади. Это расширяет возможности обучения всех учащихся, а не только учащихся с ограниченными возможностями. Существуют некоторые препятствия на пути к доступным технологиям, но иногда можно найти решения.

В данной работе приводится системный анализ проблем коммуникаций людей с ограниченными возможностями здоровья, системный анализ проблем, возможностей их решения. Рассмотрены федеральные и мировые законопроекты для улучшения качества жизни для людей с ОВЗ, также рассмотрена классификация нозологических групп людей с ОВЗ и распределение информационных технологий, облегчающих использование компьютером для каждой нозологической группы.

Для решения поставленной проблемы было решено реализовать интернет-браузер с функцией «режим чтения», которая позволяет распознавать на сайте заголовок статьи, тело статьи, выделять их, таким образом, избавляясь от лишнего контента на странице, для комфортного чтения и навигации. Также данная программа позволяет предоставлять текстовый контент в альтернативной форме – голосовой форме.

Список литературы

1. Разработка методов и средств адаптации электронного интерфейса для людей с ограниченными возможностями / Аг. С. Кузнецова, В. В. Гилка, В. В. Горбачева, В. Л. Розалиев, Ф. Ч. Окороджи Дюк // Искусственный интеллект и цифровые технологии в технических системах 2020» (AIDTTS-2020): сборник Международной научной конференции. Волгоград, 2020.

2. Разработка инструмента для анализа речи пациента при болезни паркинсона / Д. Ф. Ч. Окороджи, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, А. С. Кузнецова, В. В. Гилка // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 2. С. 68–83.

3. Sandoz-Guermond F. L'accessibilité des E-services aux personnes non-voyantes: difficultés d'usage et recommandations // Proceedings of the 18th Conference on l'Interaction Homme-Machine. Montreal, 2006. P. 171–174.

4. Jameel A., Qadri M., Tariq Banday. Web Accessibility – A timely recognized challenge // The Business Review. 2012. Vol. 14(1&2). P. 99–102.

5. Sambhanthan A., Good A. Implications for Improving Accessibility to E-Commerce Websites in Developing Countries: A Study of Hotel Websites // International Journal of Knowledge-Based Organizations. 2011. Vol. 1, N 2. P. 1–20.

6. Доступность высшего образования для лиц с ограниченными возможностями. URL: http://www.zpu-journal.ru/zpu/2007 4/Vasilieva/14.pdf (дата обращения: 07.12.2020).

7. Иттерстад Г. Инклюзия – что означает это понятие и с какими проблемами сталкивается норвежская школа, претворяя его в жизнь? // Психологическая наука и образование. 2011. № 3. С. 41–49.

8. Anastasiou D., Kauffmann J. M. A Social Constructionist Approach to Disability: Implications for Special Education // Exceptional Children. 2011. Vol. 77, N 3. P. 367–384. https://doi.org/10.1177/001440291107700307.

9. Yuen T. T., Mason L. L., Gomez A. Collaborative Robotics Projects for Adolescents with Autism Spectrum Disorders // Journal of Special Education Technology. 2014. Vol. 29, N 1. P. 51–62.

10. Извлечение информация из Интернета при использовании языка Ruby. URL: https://www.ibm.com/-developerworks/ru/library/os-extractruby/ (дата обращения: 10.12.2020).

11. ИКТ для инклюзивного образования. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000190431_ru (дата обращения: 11.12.2020).

12. Подходы к извлечению данных из веб-ресурсов. URL: https://habrahabr.ru/ post/99918/ (дата обращения: 11.12.2020).

13. Kuppusamy K. S., Leena Mary Francis, Aghila G. Web Interface for people with Low-Vision Issues // International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA). 2012. Vol. 2, No. 2. P. 15–23.

14. Тематическая классификация статей новостного ресурса методами латентно-семантического анализа. URL: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36616 (дата обращения: 11.12.2020).

15. Агавона Е. Л., Алексеева М. Н., Алехина С. В. Готовность педагогов как основной фактор успешности инклюзивного процесса в образовании // Психологическая наука и образование. 2011. № 1. С. 302.

16. Орлова Ю. А. Методы адаптации текстовой информации для лиц с ограниченными возможностями по зрению // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2015. № 4 (32). С. 210–219.

17. Доступность высшего образования для лиц с ограниченными возможностями. URL: http://www.zpu-journal.ru/zpu/2007_4/Vasilieva/14.pdf (дата обращения: 12.12.2020).

18. Башаев С. В., Горелик В. В. Проблемы социальной адаптация лиц с ограниченными возможностями здоровья в современном обществе // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4(46). С. 131–134.

19. Kohlschutter C. A. Densitometric analysis of web template content // WWW'11: Proc. of the 18th intl. conf. on World Wide Web. New York, 2011.

References

1. Kuznetsova Ag. S., Gilka V. V., Gorbacheva V. V., Rozaliev V. L., Okoroji F. Ch. Duke. [Development of methods and means of adaptation of the electronic interface for people with disabilities]. Iskusstvennyi intellekt i tsifrovye tekhno-logii v tekhnicheskikh sistemakh 2020 (AIDTTS-2020). Sbornik Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii [Artificial Intelligence and Digital Technologies in Technical Systems 2020 (AIDTTS-2020). Collection International scientific conference]. Volgograd, 2020. (In Russ.)

2. Okorodji D. F. Ch., Orlova Yu. A., Rozaliev V. L., Kuznetsova A. S., Gilka V. V. Razrabotka instrumenta dlya analiza rechi patsienta pri bolezni parkinsona [Development of a tool for analyzing the speech of a patient with Parkinson's disease]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. Seriya. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Technology, Informatics. Medical Instrumentation*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 68–83.

3. Sandoz-Guermond F. L'accessibilité des E-services aux personnes non-voyantes: difficultés d'usage et recommendations. Proceedings of the 18th Conference on l'interaction Homme-Machine. Montreal, 2006, pp. 171–174.

4. Jameel A., Qadri M., Tariq Banday. Web Accessibility - A timely recognized challenge. *The Business Review*, 2012, vol. 14(1&2), pp. 99–102.

5. Sambhanthan A., Good A. Implications for Improving Accessibility to E-Commerce Websites in Developing Countries: A Study of Hotel Websites. *International Journal of Knowledge-Based Organizations*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 1–20.

6. Dostupnost' vysshego obrazovaniya dlya lits s ogranichennymi vozmozhnostyami [The availability of higher education for persons with disabilities vozmozhnost mi]. Available at: http://www.zpu-journal.ru/zpu/2007 4/Vasilieva/14. pdf. (accessed 07.12.2020)

7. Itterstad G. Inklyuziya – chto oznachaet eto ponyatie i s kakimi problemami stalkivaetsya norvezhskaya shkola, pretvoryaya ego v zhizn'? [Inclusion – what does this concept mean and what problems does the Norwegian school face when implementing it?]. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie = Psychological Science and Education*, 2011, no. 3, pp. 41–49.

8. Anastasiou D., Kauffmann J. M. A Social Constructionist Approah to Disability: Implications for Special Education. *Exceptional Children*, 2011, vol. 77, no. 3, pp. 367–384. https://doi.org/10.1177/001440291107700307.

9. Yuen T. T., Mason L. L., Gomez A. Collaborative Robotics Projects for Adoles-cents with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Special Education Technology*, 2014, vol. 29, no. 1, pp. 51–62.

10. Izvlechenie informatsiya iz Interneta pri ispol'zovanii yazyka Ruby [Extract information from the Internet when using the Ruby language]. Available at: https://www.ibm.com/-developerworks/ru/library/os-extractruby/. (accessed 11.12.2020)

11. IKT dlya inklyuzivnogo obrazovaniya [ICT for inclusive education]. Available at: https://unesdoc.unesco.org/ ark:/48223/ pf0000190431_ru. (accessed 11.12.2020)

12. Podkhody k izvlecheniyu dannykh iz veb-resursov [Approaches to extracting data from web resources]. Available at: https://habrahabr.ru/post/99918. (accessed 11.12.2020)

13. Kuppusamy K. S., Leena Mary Francis, Aghila G. Web Interface for people with Low-Vision Issues. *International Journal on Computational Sciences & Applications* (IJCSA), 2012, vol. 2, no. 2, pp. 15–23.

14. Tematicheskaya klassifikatsiya statei novostnogo resursa metodami latentno-semanticheskogo analiza [Thematic classification of news resource articles by methods of latent-semantic analysis]. Available at: https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36616. (accessed 11.12.2020)

15. Agavona E. L., Alekseeva M. N., Alyokhina S. V. Gotovnost' pedagogov kak os-novnoi faktor uspeshnosti inklyuzivnogo protsessa v obrazovanii [Readiness of teachers as the main factor of success of the inclusive process in education]. *Psikhologicheskaya nauka i obrazovanie = Psychological Science and Education*, 2011, no. 1, pp. 302.

16. Orlova Yu. A. Metody adaptatsii tekstovoi informatsii dlya lits s ograni-chennymi vozmozhnostyami po zreniyu [Methods of adaptation of text information for persons with limited vision capabilitie]. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii = Caspian Journal: Management and High Technologies*, 2015, no. 4 (32), pp. 210–219.

17. Dostupnost' vysshego obrazovaniya dlya lits s ogranichennymi vozmozhnostyami [Accessibility of higher education for persons with disabilities]. Available at: http://www.zpu-journal.ru/zpu/2007_4/Vasilieva/14.pdf. (accessed 12.12.2020)

18. Bashaev S. V., Gorelik V. V. Problemy sotsial'noi adaptatsiya lits s ograni-chennymi vozmozhnostyami zdorov'ya v sovremennom obshchestve [Problems of social adaptation of persons with limited health opportunities in modern society]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2016, no. 4(46), pp. 131–134.

19. Kohlschutter C. A. Densitometric analysis of web template content. WWW'11: Proc. of the 18th intl. conf. on World Wide Web. New York, 2011.

Информация об авторе / Information about the Author

Кузнецова Агнесса Сергеевна, старший преподаватель кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Agnessa S. Kuznetsova, Senior Lecturer of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: agnessakyz@yandex.ru

Гилка Вадим Викторович, преподаватель кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, e-mail: gilka_vv@mail.ru

Vadim V. Gilka, Lecturer of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: gilka_vv@mail.ru

Качанов Юрий Александрович, ассистент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, e-mail: yura_1234@mail.ru

Yurii A. Kachanov, Assistant of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: yura_1234@mail.ru

Чумаков Артем Владимирович, аспирант кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, e-mail: chumakovtema@gmail.com

Artem V. Chumakov, Post-Graduate Student of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: chumakovtema@gmail.com

Окороджи Дюк Филип Чике, аспирант кафедры программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, e-mail: dukechike007@gmail.com

Okoroji Duke Philip Chike, Post-Graduate Student of Software Engineering Department, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: dukechike007@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 628.4

Совершенствование методов оценки негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения

И. О. Кирильчук[1] ✉, А. В. Иорданова[1], С. А. Филист[1]

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

✉ e-mail: iraida585@mail.ru

Резюме

Цель исследования. *Проблема образования отходов производства и потребления является одной из основных экологических проблем индустриального общества, при этом в России до сих пор основным методом утилизации отходов является их захоронение на объектах размещения отходов (полигонах, санкционированных и несанкционированных свалках). Отдельную группу объектов размещения отходов составляют стихийные несанкционированные свалки твердых коммунальных отходов. Особенность этих ОРО состоит в сложности контроля за их образованием и проблематичности оценки их воздействия на окружающую среду и здоровье населения. Нормативно утвержденная методика оценки экологической и социальной опасности стихийных несанкционированных свалок в настоящее время отсутствует. С этой целью авторами был разработан метод экспресс-оценки опасности несанкционированных свалок, основанный на сравнении фактических характеристик свалок, полученных при натурных обследованиях городских территорий, с определенными табличными значениями. Апробация метода показала возникновение аномалий расчета, связанных с определением класса опасности только по одному параметру, в связи с чем цель исследования состоит в разработке актуализированного метода, отличающегося уточненным алгоритмом расчета класса экологической опасности стихийных несанкционированных свалок, исключающего возникновение указанных аномалий расчета, а также учетом стоимостной оценки экологического ущерба, нанесенного поверхности земли несанкционированными свалками.*

Методы. *Главным методологическим инструментом для выполнения всех этапов исследования служит системный анализ. Решение частных задач исследования осуществляется посредством использования объектно ориентированного программирования и геоинформационного анализа. Кроме того, был использован диалектический метод как общий научный метод познания, приемы статистического и сравнительного анализа, а также методы индукции и дедукции.*

© Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Филист С. А., 2021

Результаты: *метод экспресс-оценки экологической и социальной опасности стихийных несанкционированных свалок, обеспечивающий оперативное получение результатов на основе данных натурных обследований городских территорий, при котором первоначальный учет свалок осуществляется с использованием интернет-портала, реализующего геоинформационную технологию.*

Заключение. *Использование интернет-портала оперативного обнаружения стихийных несанкционированных свалок, а также авторского метода и реализующего данный метод программного обеспечения позволяет провести экспресс-оценку экологической и социальной опасности свалок на основе данных натурных обследований городских территорий без проведения лабораторных замеров. Полученные результаты предназначены для классификации стихийных свалок в целях разработки планов их ликвидации с учетом приоритетов экологической политики.*

Ключевые слова: *твердые коммунальные отходы; объект размещения отходов (ОРО); стихийная несанкционированная свалка; экологическая и социальная опасность; геоинформационные технологии.*

Конфликт интересов*: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.*

Финансирование: *Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-941.2019.5.*

Для цитирования: Кирильчук И. О., Иорданова А. В., Филист С. А. Совершенствование методов оценки негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 82–97.

Поступила в редакцию 11.01.2021 *Подписана в печать 11.02.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Improving Methods for Assessing the Negative Impact of Waste Disposal Facilities on the Environment and Public Health

Iraida O. Kirilchuk[1] ✉, Anastasiya V. Iordanova[1], Sergey A. Filist[1]

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

✉ e-mail: I iraida585@mail.ru

Abstract

The purpose research. *The problem of production and consumption waste generation is one of the main environmental problems of industrial society, while in Russia, the main method of waste disposal is still disposal at waste disposal sites (landfills, authorized and unauthorized dumps). A separate group of waste disposal facilities consists of spontaneous unauthorized landfills of solid municipal waste. The peculiarity of these ORS is the complexity of monitoring their formation and the problematic assessment of their impact on the environment and public health. Currently, there is no legally approved methodology for assessing the environmental and social risks of natural unauthorized landfills. For this purpose, the authors developed a method for rapid assessment of the risk of unauthorized landfills, based on comparing the actual characteristics of landfills obtained during field surveys of urban*

areas with certain table values. Approbation of the method showed the occurrence of abnormalities of the calculation associated with determining the hazard class of only one parameter, therefore the aim of the research is the development of the updated method, characterized by refined calculation algorithm class environmental disaster of unauthorized dumps, eliminating the occurrence of these anomalies calculation, as well as accounting for valuation of environmental damage to the earth's surface unsanctioned dumps.

Methods. *The main methodological tool for the implementation of all stages of the research is the system analysis. The solution of particular research tasks is carried out by using object-oriented programming and geoinformation analysis. In addition, the dialectical method was used as a General scientific method of knowledge, methods of statistical and comparative analysis, as well as methods of induction and deduction.*

Results: *a method for rapid assessment of environmental and social risks of natural unauthorized landfills, which provides rapid results based on data from field surveys of urban areas, in which the initial accounting of landfills is carried out using an Internet portal that implements geoinformation technology.*

Conclusion. *The use of the Internet portal for rapid detection of natural unauthorized landfills, as well as the author's method and software implementing this method allows rapid assessment of the environmental and social danger of landfills based on data from field surveys of urban areas without laboratory measurements. The results obtained are intended for classifying natural landfills in order to develop plans for their elimination, taking into account the priorities of environmental policy.*

Keywords: *solid municipal waste; waste disposal facility; spontaneous unauthorized landfill; environmental and social hazard; geoinformation technologies.*

Conflict of interest: *The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.*

Funding: *The work was carried out within the framework of the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists MK-941.2019.5.*

For citation: Kirilchuk I. O., Iordanova A. V., Filist S. A. Improving methods for assessing the negative impact of waste disposal facilities on the environment and public health. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 82–97. (In Russ.)

Received 11.01.2021 *Accepted 11.02.2021* *Published 30.03.2021*

***

Введение

Проблема образования отходов производства и потребления является одной из основных экологических проблем индустриального общества на современном этапе его развития [1; 2; 3; 4; 5]. Несмотря на то, что в мире осознана необходимость грамотного управления отходами, исключающего их аккумулирование в объектах окружающей среды, в России до сих пор основным методом утилизации отходов является их захоронение на объектах размещения отходов [6; 7; 8].

К наиболее распространенным объектам размещения отходов относятся:

1) полигоны – намеренно организованные сложные комплексы инженерных конструкций, предусмотренные для размещения и обезвреживания отходов;

2) свалки – места временного расположения отходов.

Свалки принято классифицировать на санкционированные, т. е. допустимые местными органами власти земли для размещения отходов, и несанкциониро-

ванные – незаконные места складирования отходов производства и потребления [9].

Отдельную группу объектов размещения отходов составляют стихийные несанкционированные свалки твердых коммунальных отходов. Особенность этих ОРО состоит в сложности контроля за их образованием и проблематичностью оценки их воздействия на окружающую среду и здоровье населения [10].

Твердые коммунальные отходы современных городов содержат в своем составе огромное количество различных токсичных компонентов, основными из которых являются тяжелые металлы (свинец, кадмий, талий и т. п.) и их соединения, полимерные материалы (различные пластмассы и их производные), а также пестициды и красители. Все перечисленные компоненты отличаются тем, что способны длительное время находиться в окружающей среде, не подвергаясь процессам биологического разложения [11].

Компонентный состав ТКО, образующихся на территории определенной области, зависит от уровня технологического развития региона, культурного уровня и традиций населения, а также от времени года и многих других причин. Более трети ТКО составляют упаковочные материалы, количество которых непрерывно увеличивается. Твердые коммунальных отходы состоят из очень многих компонентов, имеют неоднородный состав, а также способны к загниванию в связи с наличием в их составе органических компонентов. Кроме того, они характеризуются малой плотностью. К ТКО относится: бумага и продукты из целлюлозы (30 % от общего состава отходов); пищевые отходы (30 %); пластмасса (4 %); сплавы металлов (4 %); вещи из текстиля и шерсти (4 %); дерево (3 %); стекло; кожаные изделия; резина; мусор с улицы или из дома (25 % приходится на последние 4 категории) [12].

С течением времени все отходы претерпевают изменения, вызванные как внутренними физико-химическими процессами, так и влиянием внешних условий, в т. ч. колониями эндогенных, в некоторых случаях опасных для здоровья человека, микроорганизмов. В результате этого могут образовываться как новые экологически опасные вещества, так и новые виды микроорганизмов, которые представляют серьезную угрозу для окружающей природной среды и здоровья горожан. Стоит также отметить, что при хранении отходы становятся благоприятной средой для размножения насекомых, птиц и млекопитающих, являющихся переносчиками болезнетворных бактерий и вирусов [9].

Ещё одним негативным фактором воздействия полигонов на окружающую среду является фильтрат, формирую-

щийся в теле объекта размещения отходов (ОРО) при взаимодействии отходов с инфильтрующимися атмосферными осадками. Фильтрат содержит многочисленные компоненты распада органических и минеральных веществ.

Влияние различных веществ, образующихся в процессе разложения отходов на окружающую среду и живые организмы, представлено ниже (табл. 1).

Таблица 1. Влияние продуктов разложения отходов на окружающую среду и живые организмы

Table 1. Impact of waste decomposition products on the environment and living organisms

Вредные вещества	Основные процессы образования вредного вещества	Влияние на состояние окружающей среды
Оксид углерода (IV), углекислый газ CO2	Сжигание мусора	Парниковый эффект
Оксид углерода (II), угарный газ CO	Сжигание мусора	Нарушение теплового баланса атмосферы
Свинец и другие тяжелые металлы	Свалки	Накопление в организмах по пищевым цепям
Диоксины	Сжигание пластика	Мутации организма
Ртуть	Свалки	Накопление в организмах по пищевым цепям
Метан	Гниение	Парниковый эффект

Примечание. Составлено авторами на основе [9; 10; 11; 12].

Оценка негативного воздействия полигонов и санкционированных свалок твердых коммунальных отходов на окружающую среду осуществляется в процессе их мониторинга. Особенности организации системы комплексного мониторинга указанных объектов размещения отходов и направления ее совершенствования подробно рассмотрены в [13].

Негативное воздействие полигонов и санкционированных свалок на состояние здоровья людей может быть проанализировано в процессе оценки риска для здоровья населения воздействия химических веществ, загрязняющих окружающую среду[1].

[1] Р.2.1.10.1920–04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

Особенности процедуры оценки риска негативного воздействия объектов размещения отходов на окружающую среду и здоровье населения рассмотрены в [14]. Применение информационных технологий для оценки риска здоровью населения от выбросов полигона твердых коммунальных отходов проанализировано в [15].

Как уже неоднократно было отмечено авторами в работах [16; 17], нормативно утвержденная методика оценки экологической и социальной опасности стихийных несанкционированных свалок в настоящее время отсутствует. С этой целью авторами был разработан метод экспресс-оценки опасности несанкционированных свалок, основанный на сравнении фактических характеристик свалок, полученных при натурных обследованиях городских территорий, с определенными табличными значениями [18].

Апробация метода показала возникновение аномалий расчета, связанных с определением класса опасности только по одному параметру, в связи с чем необходима разработка актуализированного метода, отличающегося уточненным алгоритмом расчета класса экологической опасности стихийных несанкционированных свалок, исключающего возникновение указанных аномалий расчета, а также с учетом стоимостной оценки экологического ущерба, нанесенного поверхности земли несанкционированными свалками.

Материалы и методы

Для обнаружения и первоначального учета стихийных несанкционированных свалок, образующихся на городской территории, используется интернет-ресурс [19], предоставляющий пользователям возможность в онлайн-режиме нанести на интерактивную карту города местоположения свалок ТКО в виде точечных объектов, а также ввести следующую атрибутивную информацию: местоположение объекта, приблизительный состав (бумага, пластиковая тара, пищевые отходы и т. д.), размер свалки, причины образования данного объекта (несвоевременный вывоз мусора специализированными организациями, отсутствие контейнерной площадки или недостаточное количество контейнеров и т. д.), возможные, по мнению регистрирующего свалку человека, пути решения данной проблемы. Разработанный интернет-ресурс доступен в пользовательском режиме по адресу www.dev.im46.ru, интерфейс интернет-ресурса представлен ниже (рис. 1).

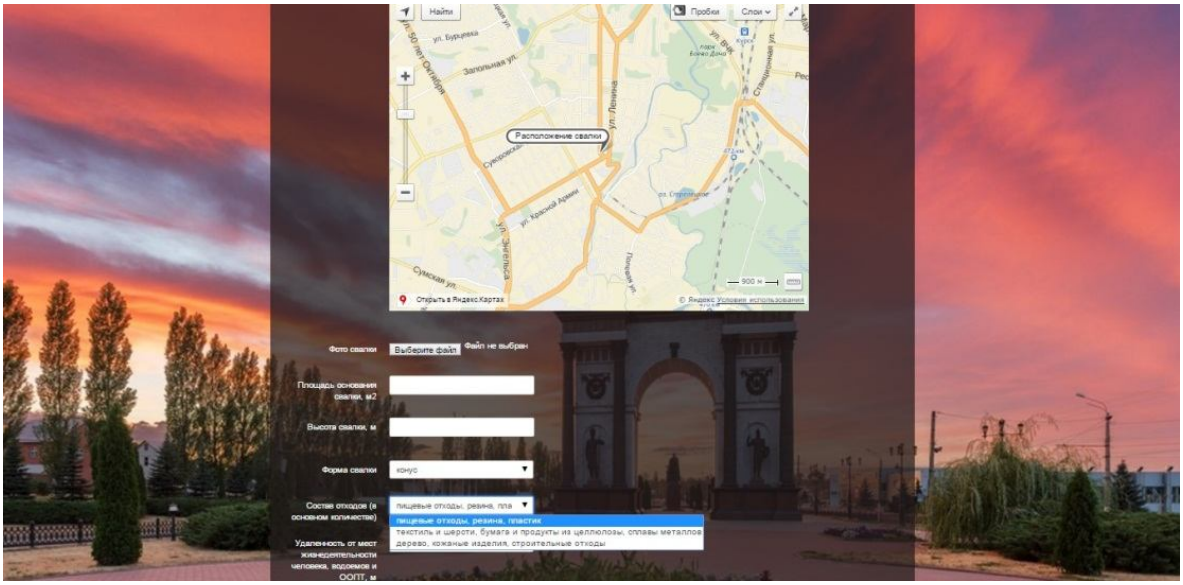


Рис. 1. Интерфейс интернет-ресурса по учету стихийных несанкционированных свалок (разработано авторами)

Fig.1. Interface of an Internet resource for accounting for spontaneous unauthorized landfills (developed by the authors)

Следующей ступенью является оценка опасности свалки с использованием подключаемых внешних программных модулей, реализующих авторский алгоритм расчета класса экологической опасности свалки.

Результаты и их обсуждение

Определение класса экологической опасности свалки К осуществляется на основании анализа определенных параметров:

$$К = К(S,C,L,V_ф,T,УЩ_{отх}),$$

где S – площадь свалки, м^2;

C – примерный состав складируемых отходов;

L – удаленность от мест жизнедеятельности человека, водоемов и ООПТ, м;

$V_ф$ – объем образующегося фильтрата, м^3/год;

T – время существования свалки, лет;

$УЩ_{отх}$ – размер вреда почвам, как объекту окружающей среды, руб.

В таблице 2 приведено соответствие указанных параметров классу опасности свалки.

Определение класса экологической опасности несанкционированной свалки происходит следующим образом: фактические характеристики свалки поочередно сравниваются с табличными. Если три и более параметров из фактических значений совпадают со значением из первой строки, свалка получает класс опасности I. При отсутствии совпадений в первой строке такое же сравнение проводится со второй строкой, затем с третьей и последующими. Если же обнаруживается совпадение двух и более параметров во второй строке и одного или двух в первой, присваивается II класс опасности. По аналогии осуществляется проверка по всем строкам таблицы.

Таблица 2. Определение класса экологической опасности свалки

Table 2. Determination of the environmental hazard class of the landfill

К	S, м^2	С, %	L, м	Т, лет	$V_ф$, м^3/год	$УЩ_{отх}$, тыс. руб.
I – чрезвычайно опасные	>20	Пищевые отходы, резина, пластик	<50	>2	>15	$УЩ_{отх}$>10
II – высокоопасные	15<S<20	Бумага, металл	50<L<100	1,5<T<2	10<$V_ф$<15	5<$УЩ_{отх}$<10
III – умеренно опасные	10<S<15	Текстиль, шерсть	100<L<200	1,5<T<2	10<$V_ф$<15	2<$УЩ_{отх}$<5
IV – малоопасные	5<S<10	Дерево, кожаные изделия	200<L<300	1<T<1,5	5<$V_ф$<10	1<$УЩ_{отх}$<2
V – практически неопасные	S<5	Кирпич/камень	L>300	T<1	$V_ф$<5	$УЩ_{отх}$<1

Примечание. Разработано авторами.

Рассмотрим алгоритм определения класса экологической опасности стихийной несанкционированной свалки по предлагаемому способу (рис. 2).

За счет рассмотрения времени существования свалки (критерий Т) обеспечивается косвенный учет выделения биогаза. Так как значение данного параметра определяется сложными математическими зависимостями, для оперативной классификации свалки достаточно учитывать возможность образования биогаза в теле свалки, выделение которого начинается только спустя 2 года после ее возникновения.

Для нахождения объема образующегося фильтрата можно использовать модифицированное уравнение водного баланса [18; 20]:

$$V_ф = (АО + ОВ + ВБХ) – (ИС + ВНО + ПС + БГ + ПБХ),$$

где $V_ф$ – объем фильтрата;

АО – атмосферные осадки, выпавшие на полигон;

ОВ – отжимная влага;

ВБХ – выделение воды при биохимических реакциях;

ИС – испарение с поверхности полигона;

ВНО – влага, расходуемая на насыщение отходов до полной влагоемкости;

ПС – поверхностный сток;

БГ – потери воды с биогазом;

ПБХ – поглощение воды при биохимических реакциях.

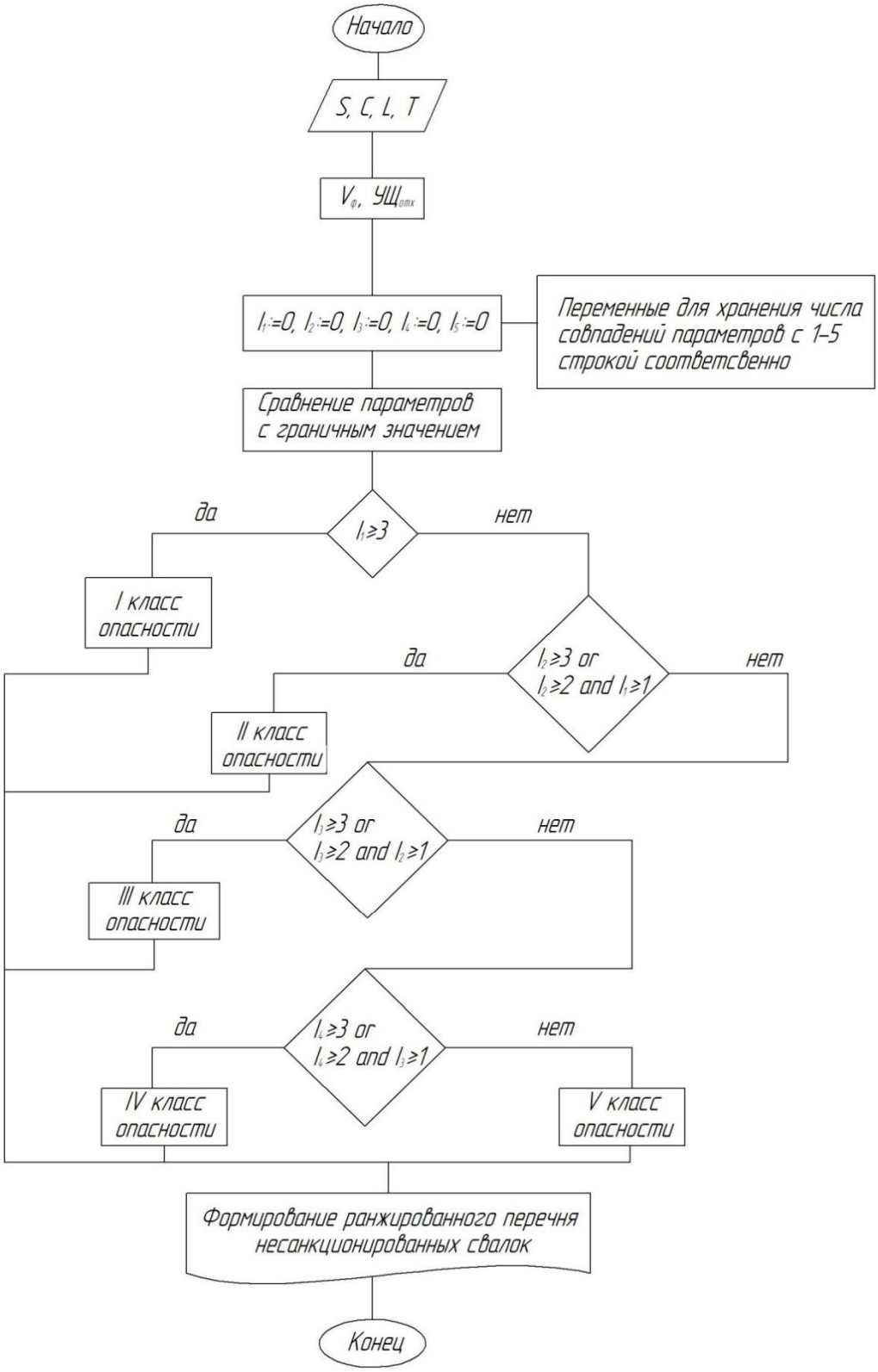


Рис. 2. Алгоритм определения класса экологической опасности стихийной несанкционированной свалки (разработано авторами)

Fig. 2. Algorithm for determining the environmental hazard class of a spontaneous unauthorized landfill (developed by the authors)

Расчет размера вреда почвам как объекту окружающей среды определяется по Методике[1] и исчисляется в стоимостной форме.

Исчисление в стоимостной форме размера вреда в результате несанкционированного размещения отходов производства и потребления осуществляется по формуле

$$УЩ_{отх} = \sum_{i=1}^{n} (M_i \cdot Т_{отх}) \cdot К_{исх},$$

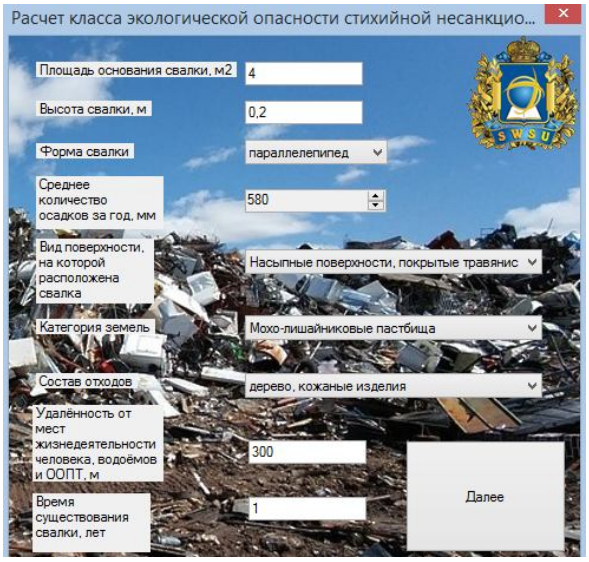
где $УЩ_{отх}$ – размер вреда, руб.;

M_i – масса отходов с одинаковым классом опасности, т;

$Т_{исх}$ – такса для исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту окружающей среды, при деградации почв в результате несанкционированного размещения отходов производства и потребления;

$К_{исх}$ – показатель, определяемый в зависимости от категории земель и целевого назначения, на которой расположен загрязненный участок.

На основе предлагаемого способа разработано специальное программное обеспечение для расчета класса экологической опасности несанкционированной свалки, интерфейс которого представлен ниже (рис. 3).



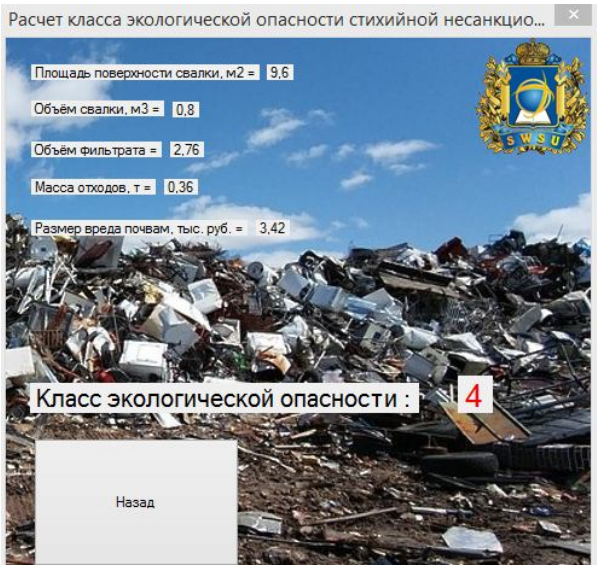


Рис. 3. Расчет класса опасности стихийной несанкционированной свалки с использованием специального ПО (разработано авторами)

Fig. 3. Calculation of the hazard class of a spontaneous unauthorized landfill using special software (developed by the authors)

[1] Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды: приказ Минприроды России от 08.07.2010 г. № 238. URL: http://www.garant.rusproducts/ipo/ prime/doc/2072837/. (дата обращения: 08.12.2020).

Выводы

Апробация разработанного алгоритма, метода и специального программного обеспечения была проведена на примере реальной стихийной несанкционированной свалки, расположенной на территории г. Курска. В таблице 3 представлены результаты оценки экологической и социальной опасности данной свалки.

Таблицы 3. Результаты оценки экологической и социальной опасности стихийной несанкционированной свалки

Table 3. Results of the assessment of environmental and social risks of spontaneous unauthorized landfills

Адрес свалки	г. Курск, ул. Хрущёва
Фото свалки	
Площадь основания свалки, м^2	4
Высота свалки, м	0,2
Форма свалки	Параллелепипед (отходы рассыпаны тонким слоем)
Состав отходов	дерево, кожаные изделия, кирпич/камень
Удаленность от мест жизнедеятельности человека, водоемов и ООПТ, м	300
Время существования свалки, лет	Менее года
Вид поверхности, на которой расположена свалка	Поверхности, покрытые травянистой и редкой кустарниковой растительностью
Статус свалки	Обнаружена
Класс опасности свалки	4

Примечание. Разработано авторами.

Таким образом, использование интернет-портала оперативного обнаружения стихийных несанкционированных свалок, а также авторского метода и реализующего данный метод программного обеспечения позволяет провести экспресс-оценку экологической и социальной опасности свалок на основе данных натурных обследований городских территорий без проведения лабораторных замеров. Полученные результаты предназначены для классификации стихийных свалок в целях разработки планов их ликвидации с учетом приоритетов экологической политики.

Список литературы

1. Caniato M., Tudor T., Vaccari M. International governance structures for health-care waste management: A systematic review of scientific literature // Journal of Environmental Management. 2015. N 153. P. 93–107.

2. Farmer T. D., Shaw P. J., Williams I. D. Destined for indecision? A critical analysis of waste management practices in England from 1996 to 2013 // Waste Management. 2015. N 39. P. 266–276.

3. Koenig A. Resource consumption and waste generation in Hong Kong // International Directory Of Solid Waste Management. 2007. N 8. P. 330–333.

4. Koltai Z. R. Environmental protection issues concerning waste management in Hungary // International Directory Of Solid Waste Management. 2007. N 8. P. 334–338.

5. Rubio J. G. The role of landfills in the current management of household and industrial waste in Spain // International Directory Of Solid Waste Management. 2007. N 8. P. 339–342.

6. Абрамов Н. Ф., Мирный А. Н., Спасский Б. М. Концепция обращения с ТБО в РФ // Чистый город. 2003. № 2. С. 36.

7. Девяткин В. Управление отходами в России: пора использовать отечественный и зарубежный опыт // Отечественные записки. 2007. № 2. С. 77–87.

8. Гладышев Н. Г. Обращение с отходами. Организационно-технические решения // Экология и промышленность России. 2007. № 9. С. 28–31.

9. Батракова Г. М., Максимова С. В., Глушанкова И. С. Оценка потенциальной опасности площадки захоронения бытовых отходов // Сергеевские чтения. 2003. № 5. С. 216−221.

10. Сергеенков А. П. Требования к местам накопления опасных отходов // Твёрдые бытовые отходы. 2015. № 6. С. 38−41.

11. Бецкой А. П. Влияние неутилизированных отходов на здоровье человека. URL: https://www.rostmaster.ru/lib/dysbacter/dysbacteriosis-0073.shtml (дата обращения: 07.12.2020).

12. Перспективы изменения состава ТБО в городах / Д. Е. Быков, Н. В. Рюмина, С. Н. Дегтерев, М. П. Седогин // Экология и промышленность России. 2017. № 7. С. 20−24.

13. Попов В. М., Кирильчук И. О., Коровина А. Ю. Совершенствование системы комплексного мониторинга полигонов твердых коммунальных отходов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 4 (25). С. 60–71.

14. 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.

15. Информационные технологии для оценки риска здоровью населения от выбросов полигона твердых коммунальных отходов / И. О. Кирильчук, О. Е. Кондратьева, О. А. Локтионов, В. В. Юшин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. № 23 (2). С. 186–201.

16. Попов В. М., Кирильчук И. О., Коровина А. Ю. Социально-экономическая оценка объектов размещения отходов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 2 (23). С. 56–65.

17. 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.

18. Юшин В. В., Кирильчук И. О. Геоинформационный учет и оценка опасности стихийных несанкционированных свалок // Безопасность жизнедеятельности. 2017. № 6 (198). С. 34–42.

19. Разработка элементов информационно-аналитической системы учета стихийных 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.

20. Методика расчета водного баланса полигонов захоронения твердых бытовых отходов / Я. И. Вайсман, В. Н. Коротаев, О. А. Тагилова, М. А. Тагилов, С. В. Чечкин, А. С. Никитенко. Пермь, 2002. С. 19.

References

1. Caniato M., Tudor T., Vaccari M. International governance structures for health-care waste management: A systematic review of scientific literature. *Journal of Environmental Management*, 2015, no. 153, pp. 93–107.

2. Farmer T. D., Shaw P. J., Williams I. D. Destined for indecision? A critical analysis of waste management practices in England from 1996 to 2013. *Waste Management*, 2015, no. 39, pp. 266–276.

3. Koenig A. Resource consumption and waste generation in Hong Kong. *International Directory Of Solid Waste Management*, 2007, no. 8, pp. 330–333.

4. Koltai Z. R. Environmental protection issues concerning waste management in Hungary. *International Directory Of Solid Waste Management*, 2007, no. 8, pp. 334–338.

5. Rubio J. G. The role of landfills in the current management of household and industrial waste in Spain. *International Directory Of Solid Waste Management*, 2007, no. 8, pp. 339–342.

6. Abramov N. F., Mirniy A. N., Spassky B. M. Kontseptsiya obrashcheniya s TBO v RF. [The Concept of solid waste management in the Russian Federation]. *Chistyi gorod = Clean City*, 2003, no. 2, pp. 36.

7. Devyatkin V. Upravlenie otkhodami v Rossii: pora ispol'zovat' otechestven-nyi i zarubezhnyi opyt [Waste Management in Russia: it's time to use domestic and foreign experience]. *Otechestvennye zapiski = Domestic Notes*, 2007, no. 2, pp. 77–87.

8. Gladyshev N. G. Obrashchenie s otkhodami. Organizatsionno-tekhnicheskie resheniya [Waste management. Organizational and technical solutions]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry in Russia*, 2007, no. 9, pp. 28–31.

9. Batrakova G. M., Maksimova C. B., Glushankova I. S. Otsenka potentsial'noi opasnosti ploshchadki zakhoroneniya bytovykh otkhodov [Assessment of the potential hazard of domestic waste disposal sites]. *Sergeevskie chtenija = Sergeyev Readings*, 2003, no. 5, pp. 216–221.

10. Sergeenkov A. P. Trebovaniya k mestam nakopleniya opasnykh otkhodov [Requirements for Hazardous Waste Accumulation Sites]. *Tverdye bytovye otkhody = Solid Waste*, 2015, no. 6, pp. 38–41.

11. Betskoy A. P. Vliyanie neutilizirovannykh otkhodov na zdorov'e cheloveka [Impact of non-recycled waste on human health]. Available at: https://www.rostmaster.ru/lib/dysbacter/dysbacteriosis-0073.shtml. (accessed 07.12.2020)

12. Bykov D. E., Ryumina N. V., Degtyarev S. N., Sedogin M. Perspektivy izmeneniya sostava TBO v gorodakh [Prospects for changing the composition of MSW in cities]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry in Russia*, 2017, no. 7, pp. 20−24.

13. Popov V. M., Kirilchuk I. O., Korovina A. Yu. Sovershenstvovanie sistemy kompleksnogo monitoringa poligonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Improvement of the system of integrated monitoring of solid municipal waste landfills]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Equipment and Technologies*, 2017, no. 4 (25), pp. 60–71.

14. Yushin V. V., Popov V. M., Kirilchuk I. O., Korovina A. Yu. Osobennosti protsedury otsenki riska negativnogo vozdeistviya ob"ektov razmeshcheniya otkhodov na okruzhayush-chuyu sredu 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-Za-padnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Equipment and Technologies*, 2018, no. 3 (28), pp. 36–49.

15. Kirilchuk I. O., Kondratieva O. E., Loktionov O. A., Yushin V. V. Informatsionnye tekhnologii dlya otsenki riska zdorov'yu naseleniya ot vybrosov poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov [Information technologies for assessing the risk to public health from landfill emissions of solid municipal waste]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of Southwest State University*, 2019, no. 23 (2), pp. 186–201.

16. Popov V. M., Kirilchuk I. O., Korovina A. Yu. Sotsial'no-ekonomicheskaya otsenka ob"ektov razmeshcheniya otkhodov [Socio-economic assessment of waste disposal facilities]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Equipment and Technologies*, 2017, no. 2 (23), pp. 56–65.

17. Kirilchuk I. O., Yushin V. V. Geoinformatsionnyi uchet i otsenka opasnosti stikh-iinykh nesanktsionirovannykh svalok [Adapted system of criteria for typing unauthorized landfills]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Equipment and Technologies*, 2017, no. 2 (23), pp. 85–93.

18. Yushin V. V., Kirilchuk I. O. Razrabotka elementov informatsionno-analiticheskoi sistemy ucheta stikhiinykh nesanktsioni-rovannykh svalok [Requirements for Hazardous Waste Accumulation Sites]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Life Safety*, 2017, no. 6(198), pp. 34–42.

19. Yushin V. V., Popov V. M., Kirilchuk I. O., Gnezdilova A. V. Metodika rascheta vodnogo balansa poligonov zakhoroneniya tver-dykh bytovykh otkhodov [Development of elements of information and analytical accounting system for unauthorized dumps]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2018, vol. 8, no. 3(28), pp. 68–80.

20. Weissman Ya. I., Korotaev V. N., Tagirova O. A., Tagilov M. A., Chechkin S. V., Nikitenko A. S. Metodika rascheta vodnogo balansa poligonov zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov [Methods for calculating the water balance of landfills for solid waste disposal]. Perm, 2002.

Информация об авторах / Information about the Authors

Кирильчук Ираида Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды, Юго-Западный государственный университет, Курск, Российская Федерация,
e-mail: iraida585@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8636-9340,
Researcher ID: N-8966-2016

Iraida O. Kirilchuk, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Labor Protection and Environment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: iraida585@mail.ru,
ORCID: 0000-0001-8636-9340Ю,
Researcher ID: N-8966-2016

Иорданова Анастасия Владимировна, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-7780-497X,
Researcher ID: AAH-7282-2020

Anastasiya V. Iordanova, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: asy.gnezdilova@yandex.ru,
ORCID: 0000-0001-7780-497X,
Researcher ID: AAH-7282-2020

Сергей Алексеевич Филист, доктор технических наук, профессор кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: sfilist@gmail.com

Sergey A. Filist, Dr. of Sci. (Engineering), Professor of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: sfilist@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 57.087

Нечеткие модели дифференциальной диагностики пиелонефрита у беременных

С. П. Серегин[1] ✉, Д. С. Родионов[1], И. М. Холименко[2], Л. П. Лазурина[3]

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

[2] Курская областная клиническая больница скорой медицинской помощи
ул. Сумская 45а, г. Курск 305007, Российская Федерация

[3] Курский государственный медицинский университет
ул. К. Маркса 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования *является улучшение показателей качества дифференциальной диагностики пиелонефрита у беременных при сокращении времени принятия решений за счет уменьшения размерности пространства признаков.*

Методы. *Дифференциальная диагностика таких форм патологии беременных, как серозный пиелонефрит, гнойной пиелонефрит и его переходная форма, относится к классу плохо формализуемых задач. Разведочный анализ структуры данных, представленных урологическим отделением БСМП г. Курска, показал, что по критериям время принятия решений качества диагностики предпочтение следует отдать методу синтеза гибридных нечетких моделей, объединяющему логику Л. Заде и Е. Шортлифа. При этом для надежной диагностики достаточно использовать данные об иммунном статусе беременных.*

Результаты. *Используя выбранный метод синтеза, в работе получена система нечетких решающих правил, объединяющих итерационные правила Е. Шортлифа с функциями принадлежности к исследуемым формам пиелонефрита. Математическое моделирование и статистические испытания полученных решающих правил показали, что по показателям иммунного статуса диагностические чувствительность, специфичность и эффективность при классификации серозных, гнойных и промежуточных форм пиелонефрита превышают уровень 0,9.*

© Серегин С. П., Родионов Д. С., Холименко И. М., Лазурина Л. П., 2021

Заключение. *В ходе исследований установлено, что для дифференциальной диагностики форм пиелонефрита у беременных по показателям иммунного статуса следует использовать гибридные нечеткие модели с агрегацией итерационных моделей оценки уверенности в принимаемых решениях с функциями принадлежности. Полученные гибридные модели, диагностические чувствительность, специфичность и эффективность выше 0,9, что позволяет повысить качество оказания медицинских услуг беременным женщинам, имеющим острые формы пиелонефрита.*

Ключевые слова*: пиелонефрит у беременных; иммунитет; гибридные нечеткие решающие правила; современные математические методы и информационные технологии.*

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

Для цитирования: Нечеткие модели дифференциальной диагностики пиелонефрита у беременных / С. П. Серегин, Д. С. Родионов, И. М. Холименко, Л. П. Лазурина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 98–116.

Поступила в редакцию 08.12.2020 *Подписана в печать 12.01.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Fuzzy Models of Differential Diagnosis of Pyelonephritis in Pregnant Women

Stanislav P. Seregin[1] ✉, Dmitry S. Rodionov[1], Ivan M. Kholimenko[2], Lyudmila P. Lazurina[3]

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

[2] Kursk Regional Clinical Hospital of Emergency Medical Care
45a Sumskaya str., Kursk 305007, Russian Federation

[3] Kursk State Medical University
3 K. Marksa str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

Purpose of the research *is to improve the quality indicators of differential diagnosis of pyelonephritis in pregnant women while reducing the decision-making time by reducing the dimension of the feature space.*

Methods*. Differential diagnosis of such forms of pathology of pregnant women as serous pyelonephritis, purulent pyelonephritis and its transitional form belongs to the class of poorly formalized tasks. Exploratory analysis of the data structure presented by the urological department of the Kursk BSMP showed that according to the criteria of decision – making time-diagnostic quality, preference should be given to the method of synthesis of hybrid fuzzy models, combining the logic of L. Zadeh and E. Shortlif. At the same time, for a reliable diagnosis, it is enough to use data on the immune status of pregnant women.*

Results. *Using the chosen synthesis method, a system of fuzzy decision rules is obtained that combines E. Shortlif's iterative rules with the functions of belonging to the studied forms of pyelonephritis. Mathematical modeling and statistical tests of the obtained decision rules showed that in terms of the immune status, the diagnostic sensitivity, specificity and effectiveness in the classification of serous, purulent and intermediate forms of pyelonephritis exceed the level of 0.9.*

Conclusion. *In the course of research, it was found that for the differential diagnosis of forms of pyelonephritis in pregnant women by indicators of immune status, hybrid fuzzy models should be used with the aggregation of iterative models for assessing confidence in decisions made with membership functions. The obtained hybrid models have diagnostic sensitivity, specificity, and effectiveness higher than 0.9, which allows improving the quality of medical services provided to pregnant women with acute forms of pyelonephritis.*

Keywords: *pyelonephritis in pregnant women; immunity; hybrid fuzzy decision rules; modern mathematical methods and information technologies.*

Conflict of interest: *The Authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Seregin S. P., Rodionov D. S., Kholimenko I. M., Lazurina L. P. F Fuzzy Models of Differential Diagnosis of Pyelonephritis in Pregnant Women. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 98–111. (In Russ.)

Received 08.12.2020 *Accepted 12.01.2021* *Published 30.03.2021*

Введение

Пиелонефрит у беременных порождает тяжелые гомеостатические нарушения, как у роженицы, так и у плода [1]. При этом современные подходы к ведению этих категории пациенток не обеспечивают требуемого качества, как по дифференциальной диагностики стадий исследуемого заболевания, так и по его профилактике. Это во многом связано с многообразием плохо учитываемых проявлений серьезного патологического процесса, обусловленного как местными проявлениями, так и системной реакцией организма. В силу этого используемые в медицинской практике инструментальные и лабораторные методы часто не обеспечивают достаточного качества диагностики, особенно при дифференциальной диагностике серозных и гнойных форм пиелонефрита [2; 3; 4]. Проведенные нами исследования позволили сделать вывод, что повысить качество дифференциальной диагностики исследуемых форм пиелонефрита можно, используя показатели иммунного статуса беременных, страдающих пиелонефритом [5; 6; 7; 8; 9]. При этом с учетом нечеткой и латентной природы исследуемых классов состояний в качестве базового математического аппарата следует использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП), разработанную в ЮЗГУ [6; 7; 8; 10], реализуемую с использованием современных информационных и интеллектуальных технологий.

Материалы и методы

В работе [2] получены и исследованы математические модели дифференциальной диагностики серозных и гнойных форм пиелонефрита у беременных на основе данных об иммунном и оксидантном статусе организма. Однако дальнейшие исследования авторов показали, что выбранный состав информативных признаков не учитывает особое состояние организма беременных и в силу этого не является оптимальным. Это делает целесообразным уточнение как списка информативных признаков, так и параметров решающих правил с целью повышения качества обслуживания исследуемой категории пациентов.

В условиях нечеткой природы исследуемых классов состояний и неявной их связи с используемым пространством признаков в работах [5; 11; 12] для выбора информативных признаков обосновывается использование теории измерения латентных переменных с моделью Г. Раша. В данной работе выбор информативных признаков осуществлялся с использованием интерактивного пакета RUMM 2020 по методике, описанной в работах [5; 11; 12].

В результате этого этапа исследований было показано, что для дифференциальной диагностики исследуемых форм пиелонефрита у беременных с качеством не хуже, чем в работе [2], достаточно использовать показатели, характеризующие иммунный статус организма, исключив блок признаков оксидантного статуса. Это позволяет сократить время и затраты на исследования почти в два раза при сохранении требуемого качества диагностики. Дальнейшие исследования показали, что при решении задач дифференциальной диагностики форм пиелонефрита других категорий пациентов, например осложненных мочекаменной болезнью, группа показателей оксидантного статуса становится более информативной.

Отобранные для синтеза решающих правил информативные признаки измеряются традиционными для медицинской практики методами [2]. Предварительный разведочный анализ с целью оптимизации состава информативных признаков с использованием интерактивного пакета RUMM 2020 осуществлялся по выборке беременных, причем у 80 беременных (первая группа) был диагностирован острый серозный необструктивный пиелонефрит. Во второй группе были беременные с острым гнойным пиелонефритом (40 беременных), остальные 30 составили контрольную группу (здоровые беременные). Обследование проводилось на сроке беременности от 32 до 34 недель [2]. Полученный в ходе оптимизации пакетом RUMM 2020 состав информативных признаков приведен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Цитокиновый спектр плазмы крови у больных острым пиелонефритом

Table 1. Cytokine spectrum of blood plasma in patients with acute pyelonephritis

Показатели	Единицы измерения	1	2	3
		Здоровые	Серозный	Гнойный
X_1: TNFα	пкг/мл	5,8±0,7	36,8±1,9	23,6±1,6
X_2: IL-lα	пкг/мл	3,8±0,3	20,4±1,1	14,3±1,0
X_3: IL-6	пкг/мл	1,7±0,2	14,1±1,5	8,2±0,5
X_4: IL-8	пкг/мл	24,7±1,9	52,6±2,3	55,2±3,6
X_5: IFNα	пкг/мл	6,2±0,8	27,3±1,7	167,3±5,1
X_6: IL-10	пкг/мл	2,9±0,05	11,9±1,1	11,3±0,09
X_7: IL-1RA	пкг/мл	450±12,7	123,4±2,1	326,4±13,3

Таблица 2. Функционально-метаболическая активность нейтрофилов периферической крови при остром пиелонефрите

Table 2. Functional and metabolic activity of peripheral blood neutrophils in acute pyelonephritis

Показатели	Единицы измерения	1	2	3
		Здоровые	Серозный	Гнойный
X_8: Активность и интенсивность фагоцитоза (ФИ)	%	79,1±3,1	46,8±3,2	57,8±4,2
X_9: Активность кислородозависимых систем (НСТ)	%	3,8±0,3	20,4±1,1	14,3±1,0

Применение МСНРП к таблицам экспериментальных данных показало, что между классами *гнойный и серозный пиелонефрит* наблюдается область, которую эксперты определили как переходная форма. Таким образом, для выбранного состава информативных признаков эксперты, как и в работе [2], выделили три класса состояний пациентов, важных для определения тактики лечения: серозный пиелонефрит (класс $\omega_{СП}$); гнойный пиелонефрит (класс $\omega_{ГП}$); переходная форма пиелонефрита между серозный и гнойной формами (класс $\omega_{ПС}$).

Анализ отобранных экспертами информативных признаков показал, что по исследуемым классам состояний они

имеют ярко выраженную нечеткую природу, и поэтому в соответствии с рекомендациями [6; 7; 8; 10; 11; 13; 14; 15; 16] их роль в диагностике исследуемых классов состояний ω_ℓ может быть представлена соответствующими функциями принадлежности $\mu_\ell(x_i)$ ($\ell = СП$ – серозный пиелонефрит, $\ell = ГП$ – гнойный пиелонефрит, $\ell = ПС$ – переходная форма пиелонефрита), т. е. $\mu_\ell(x_i)$ определяет уверенность в том, что у пациента форма пиелонефрита ω_ℓ при конкретном измеренном значении признака x_i.

Для построения графиков искомых функций принадлежности эксперты проходят предварительную подготовку в соответствии с рекомендациями, описанными в работах [11; 13]. Далее, используя метод Делфи, эксперты строят графики функций принадлежности, последовательно согласуя их формы и параметры, после чего получают соответствующие аналитические выражения.

В качестве примера приведены аналитические выражения функций принадлежности к выделенным классам состояний по признаку x_1:

$$\mu_{СП}(x_1) = \begin{cases} 0, \quad \text{если} \quad x_1 < 34; \\ 0,08x_1 - 2,72, \quad \text{если} \quad 34 \le x_1 < 39; \\ 0,4, \quad \text{если} \quad x_1 \ge 39; \end{cases}$$

$$\mu_{ГП}(x_1) = \begin{cases} 0, \quad \text{если} \quad x_1 < 6,5; \\ 0,02x_1 - 0,126, \quad \text{если} \quad 6,5 \le x_1 < 22; \\ 0,3, \quad \text{если} \quad 22 \le x_1 < 25; \\ -0,023x_1 + 0,877, \quad \text{если} \quad 25 \le x_1 < 38; \\ 0, \quad \text{если} \quad x_1 \ge 38; \end{cases}$$

$$\mu_{ПС}(x_1) = \begin{cases} 0, \quad \text{если} \quad x_1 < 34; \\ 0,39x_1 - 13,2, \quad \text{если} \quad 34 \le x_1 < 34,9; \\ -0,11x_1 + 4,3, \quad \text{если} \quad 34,9 \le x_1 < 38; \\ 0, \quad \text{если} \quad x_1 \ge 38. \end{cases}$$

Анализ использования механизмов нечеткого вывода в медицине и собственный опыт использования МСГНРП показали, что при синтезе нечетких решающих правил медицинские эксперты достаточно легко справляются с построением функцией принадлежности для одного признака, но испытывают значительные трудности в синтезе многомерных нечетких конструкций обеспечивающих требуемое качество принимаемых решений [11; 13; 15; 16].

Исключение составляет нечеткая итерационная накопительная формула Е. Шортлифа, которая определенным образом моделирует логику принятия врачебных решений [11; 13; 14; 17].

С учетом этого в качестве базового математического аппарата в данной статье используется модифицированная формула Е. Шортлифа, в которой коэффициент уверенности от одного признака заменяется соответствующей функцией принадлежности.

Эффективность использования такой конструкции в медицинской практике многократно доказывалась при решении различных задач прогнозирования, ранней и дифференциальной диагностики [6; 7; 8; 10; 11; 13; 14; 15; 16; 18; 19; 20].

Для каждого из выделенных классов состояний соответствующие коэффициенты уверенности определяются по следующим формулам:

$$КУ_{СП}(i+1) = \\ = КУ_{СП}(i) + \mu_{СП}(x_{i+1})[1 - КУ_{СП}(i)], \quad (1)$$

$$КУ_{ГП}(i+1) = \\ = КУ_{ГП}(i) + \mu_{ГП}(x_{i+1})[1 - КУ_{ГП}(i)], \quad (2)$$

$$КУ_{ПС}(i+1) = \\ = КУ_{ПС}(i) + \mu_{ПС}(x_{i+1})[1 - КУ_{ПС}(i)], \quad (3)$$

где $КУ_{СП}(i+1)$, $КУ_{ГП}(i+1)$, $КУ_{ПС}(i+1)$ – коэффициенты уверенности в классах *серьезный пиелонефрит, гнойный пиелонефрит* и переходная форма пиелонефрита соответственно; i – номер итерации, совпадающий с номером выбираемого признака из списка информативных признаков (i = 1, 2, …, 9); $\mu_{СП}(x_{i+1})$, $\mu_{ГП}(x_{i+1})$, $\mu_{ПС}(x_{i+1})$ – функции принадлежности к соответствующим классам пиелонефрита, вычисляемые для признака с номером i + 1; $КУ_{СП}(1) = \mu_{СП}(x_1)$, $КУ_{ГП}(1) = \mu_{ГП}(x_1)$, $КУ_{ПС}(1) = \mu_{ПС}(x_1)$.

Классификация по правилам (1), (2) и (3) осуществляется с использованием операции нечеткого объединения. Беременная имеет ту форму пиелонефрита, у которого больше соответствующий коэффициент уверенности, и он превышает величину порога $КУ^{П} = 0,6$. Математическое моделирование на наборах из наиболее часто встречающихся значениях признаков для всех трех классов состояний показало уверенность в классификации выше 0,9.

Результаты и их обсуждение

Для подтверждения полученных данных по качеству принимаемых решений была сформирована таблица экспериментальных данных объемом 100 человек на каждый класс с подтверждёнными диагнозами. Статистический контроль качества работы решающего правила (2) осуществлялся по той же методике, что и работе [2]. Распределение правильных и ошибочных результатов по правилам (2) приведено в таблице 3.

Результаты оценки качества классификации по таким показателям, как диагностическая специфичность (ДС), диагностическая чувствительность (ДЧ) и диагностическая эффективность (ДЭ), приведены в таблице 4.

Таблица 3. Результаты классификации моделей (2)

Table 3. Model (2) classification results

Пациенты		Результаты наблюдения	
		Положительные	Отрицательные
Класс $\omega_{СП}$	$n_{СП}=100$	93	7
	$n_0=100$	6	94
Класс $\omega_{ГП}$	$n_{ГП}=100$	91	9
	$n_0=100$	8	92
Класс $\omega_{ПС}$	$n_{ПС}=100$	89	11
	$n_0=100$	10	90

Примечание. n_0 – количество пациентов контрольной группы; $n_{СП}$ – количество пациентов класса $\omega_{СП}$; $n_{ГП}$ – количество пациентов класса $\omega_{ГП}$; $n_{ПС}$ – количество пациентов класса $\omega_{ПС}$.

Таблица 4. Показатели качества классификации

Table 4. Classification quality indicators

ПК / Класс	ДЧ	ДС	ДЭ
$\omega_{СП}$	0,93	0,94	0,93
$\omega_{ГП}$	0,91	0,92	0,91
$\omega_{ПС}$	0,89	0,90	0,90

Примечание. ПК – показатель качества работы решающего правила.

$$ДЧ = n_\ell^+ / n;\ ДЧ = n_\ell^- / n;\ ДЧ = n^+ + n^- /(n_\ell + n_0),$$

где n_ℓ^+ – количество правильных «срабатываний» правила для класса ω_ℓ ($\ell = СП, ГП, ПС$); n_ℓ – количество объектов класса ω_ℓ; n_ℓ^- – количество правильных «срабатываний» правила по классу ω_0 [2; 14].

Таким образом, по показателю ДЭ по всем диагностируемым формам пиелонефрита у беременных достигается качество классификации не хуже 0,9. Ниже 0,9 получена диагностическая чувствительность только по переходному классу (ДЧ = 0,89), что позволяет рекомендовать полученные математические

модели для использования в практике врачей-урологов.

Для математического анализа полученных изменений показателей иммунного статуса нами применен аппарат МСГНРП, разработанной на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ [6; 7; 8; 10; 11; 13], который позволяет дифференцировать формы пиелонефрита и показывает свою эффективность. Эта система, в основе которой использовались иммунологические данные и данные состояния перекисного окисления липидов, даёт возможность с большой уверенностью делать прогноз формы болезни, а именно гнойный или серозный пиелонефрит. Это не может являться основной методикой диагностики пиелонефрита у беременных, но она может быть незаменима как вспомогательный метод, который используется в дополнение к стандартным лабораторным и инструментальным методам. Результаты проведенной работы дают основание для создания интерактивных компьютерных программ, которые помогут при установке диагноза и определения дальнейшей тактики ведения и лечения пациентов с данной патологией почек.

Выводы

В ходе проводимых исследований решалась задача улучшения показателей качества дифференциальной диагностики пиелонефрита у беременных при сокращении времени принятия решений за счет уменьшения размерности пространства признаков.

Проведенный разведочный анализ структуры данных, представленных урологическим отделением БСМП г. Курска, показал, что по критериям время принятия решений качества диагностики предпочтение следует отдать методу синтеза гибридных нечетких моделей, объединяющему логику Л. Заде и Е. Шортлифа. При этом для надежной диагностики достаточно использовать данные об иммунном статусе беременных.

Используя выбранный метод синтеза, в работе получена система нечетких решающих правил, объединяющих итерационные правила Е. Шортлифа с функциями принадлежности к исследуемым формам пиелонефрита. Математическое моделирование и статистические испытания полученных решающих правил показали, что по показателям иммунного статуса диагностические чувствительность, специфичность и эффективность при классификации серозных, гнойных и промежуточных форм пиелонефрита превышают уровень 0,9, что позволяет рекомендовать ее к практическому использованию врачами-урологами.

Список литературы

1. Verbruggen H. B., Babuska R. Fuzzy logic control advances in applications, World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems // Technology and Engineering. Vol. 23. P. 340.

2. Система поддержки принятия решений при дифференциальной диагностике форм пиелонефрита у беременных женщин на основе иммунного и оксидантного статуса / С. П. Серегин, Т. Н. Говорухина, С. Н. Родионова, И. М. Холименко, С. В. Петров, Г. В. Сипливый, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2019. Т. 53, № 5. С. 45–48.

3. Оксидантный стресс при остром серозном и гнойном пиелонефрите / И. М. Холименко, А. И. Конопля, О. И. Братчиков, Н. А. Быстрова, М. Ю. Маврин, М. Н. Шатохин // Нефрология. 2017. № 21 (1). С. 87–94.

4. Математическая оценка диагностической информативности лабораторных показателей при серозном и гнойном пиелонефрите / М. Н. Шатохин, И. М. Холименко, А. И. Конопля, О. И. Братчиков, В. П. Гаврилюк, А. В. Краснов, М. Ю. Маврин // Экспериментальная и клиническая урология. 2016. № 4. С. 104–110.

5. Применение теории измерения латентных переменных для формирования пространства информативных признаков в задачах оценки функционального состояния человека / А. В. Бойцов, Л. П. Лазурина, С. Н. Кореневская, А. Н. Шуткин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 6 (57). С. 52–58.

6. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1 (289). С. 33–35.

7. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.

8. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

9. Пат. 2478968 Российская Федерация. Способ диагностики различных форм острого пиелонефрита / Рейс Б. А., Полуэктов В. Л., Морозов С. В., Рейс А. Б. Заявл. 26.04.11; опубл. 10.04.2013. Бюл. № 10.

10. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–40.

11. Кореневский Н.А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечётких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472 с.

12. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37–40.

13. Оценка и управление состояния здоровья обучающихся на основе гибридных интеллектуальных технологий: монография / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, С. А. Горбатенко, В. И. Серебровский. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 472 с.

14. Серегин С. П. Современные информационные технологии в урологии. Курск: Курск, 2009. 364 с.

15. Korenevskiy N. A. Application of fuzzy logic for decision-making in medical expert systems // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49, is. 1. P. 46–49.

16. Use of an Interactive Method for Classification in problems of Medical Diagnosis / N. A. Korenevskiy, S. V. Degtyarev, S. P. Seregin, A. V. Novikov // Biomedical Engineering. 2013. Vol. 47, is. 4. P. 169–172.

17. Bruce G. Buchanan, Edward H. Sportlife. Rule-Based Expert Systems The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Projext. Reading: Addison-Wesley, 1984. 235 p.

18. Синтез комбинированных нечетких решающих правил для прогнозирования послеоперационных осложнений в урологии / С. П. Серегин, С. Д. Долженков, С. Н. Кореневская, Т. Н. Сапитонова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2-3. С. 293–297.

19. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша / Н. А. Кореневский, А. Н. Шуткин, Е. А. Бойцова, В. В. Дмитриева // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37–40.

20. Zadeh L. A. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. Beijing: Beijing Normal University-Press, 2005. P. 71–78.

References

1. Verbruggen H. B., Babuska R. Fuzzy logic control advances in applications, World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems. *Technology and Engineering*, 1999, vol. 23, p. 340.

2. Seregin S. P., Dolzhenkov S. D., Korenevskaya S. N., Sapitonova T. N. Sistema podderzhki prinyatiya reshenij pri differencial'noj diagnostike form pielonefrita u beremennyh zhenshchin na osnove immunnogo i oksidantnogo statusa [Decision support system for differential diagnosis of pyelonephritis forms in pregnant women based on immune and oxidant status]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment,* 2019, vol. 53, no. 5, pp. 45–48.

3. Holimenko I. M., Konoply A. I., Bratchikov O. I., Bystrova N. A., Mavrin M. Yu., Shatokhin M. N. Oksidantnyj ctress pri ostrom seroznom i gnojnom pielonefrite [Oxidant stress in acute serous and purulent pyelonephritis]. *Nefrologiya = Nephrology,* 2017, no. 21 (1), pp. 87–94.

4. Shatohin M. N., Kholimenko I. M., Konoply A. I., Bratchikov O. I., Gavrilyuk V. P., Krasnov A. V., Mavrin M. Yu. Matematicheskaya ocenka diagnosticheskoj informativnosti laboratornyh pokazatelej pri seroznom i gnojnom pielonefrite [Mathematical assessment of diagnostic informativeness of laboratory parameters in serous and purulent pyelonephritis]. *Eksperimental'naya i klinicheskaya urologiya = Experimental and Clinical Urology*, 2016, no. 4, pp. 104–110.

5. Bojcov A. V. A, Lazurina L. P., Korenevskaya S. N., Shutkin A. N. Primenenie teorii izmereniya latentnyh peremennyh dlya formirovaniya prostranstva informativnyh priznakov v zadachah ocenki funkcional'nogo sostoyaniya cheloveka [Application of the theory of measurement of latent variables for the formation of the space of informative features in the tasks of assessing the functional state of a person]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation,* 2014, no. 6 (57), pp. 52–58.

6. Korenevskij N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh system [Using fuzzy decision logic for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment*, 2015, no. 1 (289), pp. 33–35.

7. Korenevskij N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenij na nechetkih setevyh modelyah v zadachah medicinskoj diagnostiki i prognozirovaniya [Designing decision-making systems based on fuzzy network models for medical diagnostics and forecasting]. *Telekommunikacii = Telecommunications,* 2006, no. 6, pp. 25–31.

8. Korenevskij N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskih system [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for the analysis and management of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation*, 2013, no. 2, pp. 99–103.

9. Reis B. A., e. a. Sposob diagnostiki razlichnyh form ostrogo pielonefrita [Method of diagnosis of various forms of acute pyelonephritis]. Patent RF, no. 2478968, 2013.

10. Korenevskij N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh system [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = High-tech Technologies,* 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–40.

11. Korenevskij N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechyotkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

12. Korenevskij N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of the state of health based on the models of G. Rush]. *Medicinskaya tekhnika = Medical Equipment,* 2015, no. 6, pp. 37–40.

13. Korenevskij N. A., Shutkin A. N., Gorbatenko S. A., Serebrovsky V. I. Ocenka i upravlenie sostoyaniya zdorov'ya obuchayushchihsya na osnove gibridnyh intellektual'nyh tekhnologij [Assessment and management of the state of health of students on the basis of hybrid intellectual technologies]. Stary Oskol, TNT Publ., 2016. 472 p.

14. Seregin S. P. Sovremennye informacionnye tekhnologii v urologii [Modern information technologies in urology]. Kursk, Kursk Publ., 2009. 364 p.

15. Korenevskiy N. A. Application of fuzzy logic for decision-making in medical expert systems. *Biomedical Engineering,* 2015, vol. 49, is. 1, pp. 46–49.

16. Korenevskiy N. A., Degtyarev S. V., Seregin S. P., Novikov A. V. Use of an Interactive Method for Classification in problems of Medical Diagnosis. *Biomedical Engineering,* 2013, vol. 47, is. 4, pp. 169–172.

17. Bruce G. Buchanan, Edward H. Sportlife. Rule-Based Expert Systems The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Projext. Reading, Addison-Wesley Publ., 1984. 235 p.

18. Seregin S. P., Dolzhenkov S. D., Korenevskaya S. N., Sapitonova T. N. Sintez kombinirovannyh nechetkih reshayushchih pravil dlya prognozirovaniya posleoperacionnyh oslozhnenij v urologii [Synthesis of combined fuzzy decision rules for predicting postoperative complications in urology]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Medicinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation,* 2012, no. 2-3, pp. 293–297.

19. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Boytsova E. A., Dmitrieva V. V. Evaluation and management of health status based on G. Rush's models. *Medical Equipment*, 2015, no. 6, pp. 37–40.

20. Zadeh L. A. Advances in Fuzzy Mathematics and Engineering Fuzzy Sets and Fuzzy Information-Granulation Theory. Beijing, Beijing Normal University-Press, 2005, pp. 71–78.

Информация об авторах / Information about the Authors

Серегин Станислав Петрович, доктор медицинских наук, профессор, кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Stanislav P. Seregin, Dr. of Sci. (Medical), Professor, Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Родионов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Dmitry S. Rodionov, Post-Graduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Холименко Иван Михайлович, врач-уролог, Курская городская клиническая больница скорой медицинской помощи,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Ivan M. Holimenko, Urologist, Kursk City Clinical Hospital of Emergency Medical Care, Kursk, Russian Federation,
e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Лазурина Людмила Петровна, доктор биологических наук, заведующая кафедрой биологической и химической технологии, профессор, Курский государственный медицинский университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

Lyudmila P. Lazurina, Dr. of Sci. (Biological), Head of the Department of Biological and Chemical Technology, Professor, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: lazurinalp@kursksmu.net

Оригинальная статья / Original article

УДК 001.891.573

Разработка модели определения угла Кобба и метода оценки кривизны позвоночника в сагиттальной и фронтальной плоскостях на базе системы захвата движения Antilatency

А. Р. Донская[1], Ю. А. Орлова[1] ✉, В. Л. Розалиев[1], Д. С. Зыков[1]

[1] Волгоградский государственный технический университет
пр. им. В. И. Ленина 28, г. Волгоград 400006, Российская Федерация

✉ e-mail: poas@vstu.ru

Резюме

Цель исследования *представляет собой разработку модели автоматизированного определения угла Кобба и метода автоматизированной безрентгеновской оценки кривизны позвоночного столба в двух плоскостях – фронтальной и сагиттальной, а также изучение кинематики позвоночного столба в процессе ходьбы с помощью технологии захвата движения Antilatency.*

Методы. *В данной статье предлагается метод выявления подросткового идиопатического сколиоза (ПИС) путем использования взаимосвязи между кинематикой позвоночника в процессе ходьбы и прогрессированием ПИС, а также рассматривается модель для безрентгеновского определения угла Кобба. Данная модель разработана для использования в трех взаимосвязанных случаях: 1) получение динамики позвоночника после совершения нескольких шагов; 2) автоматизация процесса поиска углов в двух плоскостях – сагиттальной и фронтальной; 3) определение наличия или отсутствия искривления позвоночника в двух плоскостях.*

Набор данных для анализа получен с помощью 10 добровольцев в результате их прохождения в системе захвата движения Antilatency.

Результаты. *Результатом данной работы станет возможность автоматического сбора данных о динамике верхнего позвоночного отдела, а также изучение возможных отклонений в структуре позвоночника, что станет первым шагом на пути построения цифровой оси позвоночника.*

Заключение. *В данном исследовании рассмотрены и разработаны модель поиска угла Кобба в двух плоскостях – сагиттальной и фронтальной, метод безрентгеноской оценки кривизны позвоночника у детей и подростков от 10 до 18 лет путем использования взаимосвязи между кинематикой позвоночного столба во время ходьбы и прогрессированием подросткового идиопатического сколиоза. Произведен сбор данных с 10 добровольцев. В результате анализа данных было выявлено, что у здоровых людей более четко выраженная динамика верхнего позвоночного отдела во фронтальной плоскости, чем у людей с ПИС.*

Ключевые слова*: подростковый идиопатический сколиоз; системы захвата движения; автоматическое определение отклонений; безрентгеновская модель; угол Кобба.*

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

© Донская А. Р., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л., Зыков Д. С., 2021

Финансирование: *Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и администрации Волгоградской области (грант 19-47-340013, 20-07-00502, 19-47-343001, 19-47-343009, 19-47-340003, 19-07-00020, 19-47-343002).*

Для цитирования: Разработка модели определения угла Кобба и метода оценки кривизны позвоночника в сагиттальной и фронтальной плоскостях на базе системы захвата движения Antilatency / А. Р. Донская, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, Д. С. Зыков // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 112–128.

Поступила в редакцию 27.12.2020 *Подписана в печать 28.01.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Development of a Model for Determining the Cobb Angle and a Method for Estimating the Curvature of the Spine in the Sagittal and Frontal Planes Based on the Motion Capture System Antilatency

Anastasia R. Donskaya[1], Yulia A. Orlova[1] ✉, Vladimir L. Rosaliev[1], Dmitry S. Zykov[1]

[1] Volgograd State Technical University
28 V. I. Lenin ave., Volgograd 400006, Russian Federation

✉ e-mail: poas@vstu.ru

Abstract

Purpose of research *is to develop a model for automated determination of the Cobb angle and a method for automated non-X-ray estimation of the curvature of the vertebral column in two planes: frontal and sagittal, as well as to study the kinematics of the vertebral column during walking using the motion capture technology Antilatency.*
Methods. *This article proposes a method for identifying adolescent idiopathic scoliosis (PIS) by using the relationship between the kinematics of the spine during walking and the progression of PIS. We also consider a model for the Trentgen-free determination of the Cobb angle. This model is designed to be used in three interrelated cases:receiving getting the dynamics of the spine after taking a few steps;2) automating the process of finding angles in two planes – sagittal and frontal; 3) definition determination of the presence or absence of curvature of the spine in two planes.*
The data set for the analysis was obtained with the help of 10 volunteers as a result of their passage in the Antilatency motion capture system.
Results. *The result of this work will be the ability to automatically collect data on the dynamics of the upper vertebral region, as well as the study of possible deviations in the structure of the spine, which will be the first step towards building a digital axis of the spine.*
Conclusion. *In this study, we considered and developed a model for searching for the Cobb angle in two planes: sagittal and frontal, a method for non-X-ray assessment of the curvature of the spine in children and adolescents from 10 to 18 years, by using the relationship between the kinematics of the spinal column during walking and the progression of adolescent idiopathic scoliosis. Data was collected from 10 volunteers. As a result of the data analysis, it was revealed that healthy people have a more pronounced dynamics of the upper vertebral region in the frontal plane than people with PIS.*

Keywords: *adolescent idiopathic scoliosis; motion capture systems; automatic detection of deviations; non-X-ray model; Cobb angle.*

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 partially supported by the RFBR and the administration of the Volgograd Region (grant). 19-47-340013, 20-07-00502, 19-47-343001, 19-47-343009, 19-47-340003, 19-07-00020, 19-47-343002).*

For citation: Donskaya A. R., Orlova Yu. A., Rosaliev V. L., Zykov D. S. Development of a Model for Determining the Cobb Angle and a Method for Estimating the Curvature of the Spine in the Sagittal and Frontal Planes Based on the Motion Capture System Antilatency. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 112–128. (In Russ.)

Received 27.12.2020 *Accepted 28.01.2021* *Published 30.03.2021*

Введение

Подростковый идиопатический сколиоз (в дальнейшем – ПИС) [1] – это сложная стойкая структуральная деформация позвоночника, включающая в себя лордоз и кифоз, происхождение которой остается сложно выяснить [1; 2].

В настоящее время выявление и подтверждение диагноза, ведение болезни – это сложная многоэтапная процедура, в которую вовлечены несколько специалистов, а также дорогостоящее оборудование, которое при неправильном использовании к тому же может нанести вред пациенту. На данный момент основным способом для подтверждения диагноза ПИС является 2D-рентгенография, которая, конечно, менее информативна, чем более дорогостоящее МРТ или КТ, но является более доступной и менее трудоемкой, чтобы на основе нее можно было сделать заключение о наличии или отсутствии заболевания [3]. К тому же нельзя забывать и о трудностях в самом вычислении меры кривизны позвоночника, которые могут быть связаны с необходимостью интуитивного выбора нейтрального позвонка для оценки, а также использованием ряда специфических инструментов. Стоит отметить и тот факт, что оценка меры искривления позвоночного столба, сделанная с помощью одного и того же рентгеновского снимка разными специалистами, может значительно различаться, что не может не повлиять на возникновение противоречивых ситуаций, а значит, и на постановку ошибочного заключения и выдачу неверных рекомендация для лечения. Все это может негативно сказаться на здоровье пациента [4; 5; 6] .

В связи со всем вышесказанным становятся все более необходимы методы слежения за ходом болезни, минимизирующие возможность ошибки и двоякой оценки [7; 8; 9; 10], а также минимально прибегающие к рентгеновскому снимку [11]. Один из таких методов может быть разработан на основании последних проведенных исследований [12; 13; 14; 15],

которые показали, что существует взаимосвязь между кинематикой позвоночника, таза и нижних конечностей во время ходьбы и прогрессированием подросткового идиопатического сколиоза.

Основываясь на этом, нами была поставлена цель: упростить и обезопасить процесс оценки кривизны позвоночника, а также уточнить результаты вычислений путем реализации метода оценки меры искривления позвоночника, основанного на взаимосвязи между кинематикой позвоночника во время ходьбы и протеканием ПИС. Для реализации данной цели нами были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать методы и модели безрентгеновского измерения угла кривизны.

2. Разработать модель определения угла Кобба.

3. Разработать программные средства.

4. Провести тестирование программных средств и методики.

Материалы и методы

Наиболее актуальными становятся методы отслеживания за прогрессом болезни, не прибегающие к необходимости делать частые рентгеновские снимки или вообще позволяющие отказаться от них.

На основании исследований [16; 17; 18; 19; 20], проведенных при изучении динамики походки при наличии отклонений в осанке, было выявлено, что в ходе осуществления шага можно наблюдать изменение оси позвоночного столба во фронтальной, сагиттальной и горизонтальных областях, а значит, отклонения от нормы будут наиболее заметны при движении, что подтверждается, учитывая структурные изменения позвоночного столба при сколиозе, а следовательно, и возрастание колебаний туловища относительно фронтальной, сагиттальной и горизонтальной плоскостях за счет неустойчивости походки. Некоторые специалисты отмечают, что при прогрессировании заболевания данные отклонения от нормы только увеличиваются.

Один из методов [15], использующих взаимосвязь кинематики позвоночника и прогрессирование ПИС, был разработан в 2015 г. С. Шмидтом, Д. Стьюдером и др. В своем исследовании они дали детальную оценку спинальной походки у пациентов с ПИС по сравнению с бессимптомными пациентами, а также показали, что кривизна позвоночника может быть определена исходя из кинематики походки пациента, для чего была использована система захвата движений Vicon, а итоговый угол кривизны получался путем аппроксимации траектории точек до окружности и вычисления впоследствии ее центра, а значит, и угла

Кобба. Но, к сожалению, хотя используемая система и является одной из самых точных, но не может быть широко использована в медицинских учреждениях ввиду дороговизны и сложности наладки.

Еще одними из исследователей [12] были Eun Ji Seo, Ahnryul Choi и др. из корейского института Сунгкюнкван, где была разработана методика безрентгеновского определения угла Кобба на основании показаний 35 датчиков системы Vicon 420, позволившей снять 21 параметр с тела, и на основании мультирегрессионного анализа был рассчитан угол Кобба. Данный эксперимент имеет также один из самых больших недостатков в том, что большое значение имеет место расположения датчиков на теле, и малейшие их смещения могут привести к значительным изменениям в результатах вычислений.

На основании представления [6] о С-образном искривлений позвоночника, а также исследованиях о взаимосвязи между кинематикой позвоночника во время ходьбы и протеканием ПИС [17; 18; 20] были разработаны метод оценки кривизны позвоночника и модель определения угла Кобба на основании датчиков системы захвата движения.

Суть метода заключалась в следующем: сперва на спине пациента располагались датчики системы захвата движения, после чего его просили сделать пару проходов по специальному ковру с встроенными ИК-датчиками, далее данные считывались моделью определения угла Кобба, и в результате работы модели получали необходимые значения углов искривления в сагиттальной и фронтальной плоскостях на основании, которых могли сделать вывод о наличии или отсутствии сколиоза, а также о дефектах в динамике верхнего позвоночного отдела.

Как было сказано выше, в начале работы метода маркеры на спине пациента располагались следующим образом: первый датчик располагался в районе 6–7 шейных позвонков (CVI-CVII), второй – в районе 5–6 грудных позвонков (TV-TVI) и последний, третий датчик – в области 11–12 грудных позвонков (TXI-TXII). Такое расположение датчиков позволило нам в первом приближении оценить наличие или отсутствие искривления позвоночника в шейно-грудном и грудном отделе (рис. 1).

Так как строение позвоночника при грудном и шейно-грудном искривлении подобно дуге изгибается, то это позволяет представить данное искривление как часть окружности, которую можно построить на основании данных, получаемых с датчиков, что является первым этапом метода оценки кривизны позвоночника в сагиттальной и фронтальной плоскостях (рис. 2). На следующем этапе происходит подготовка данных.

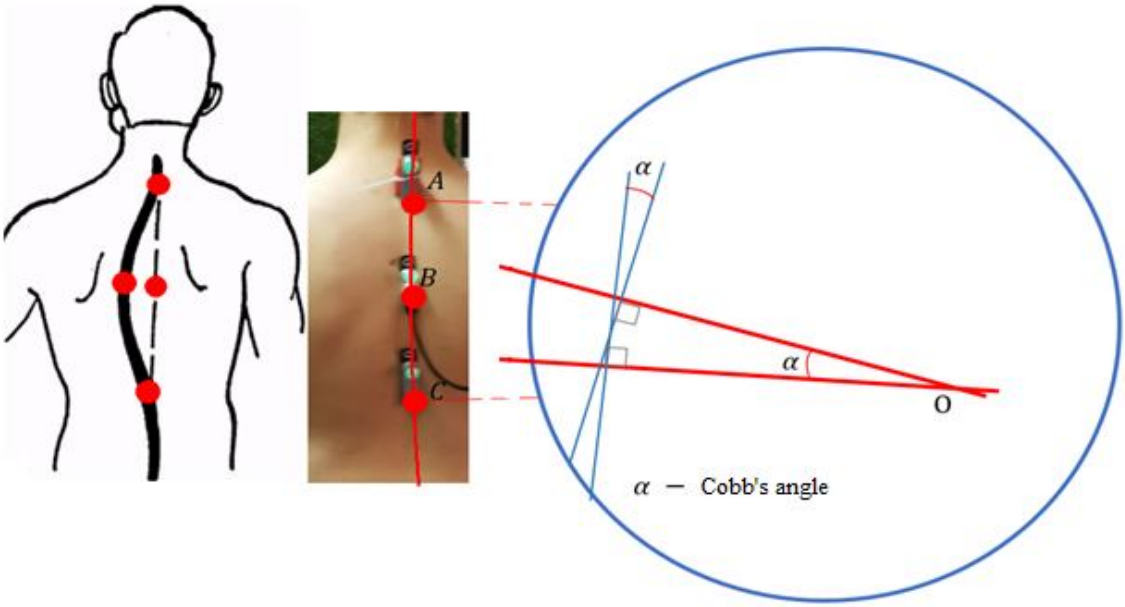


Рис. 1. Расположение датчиков на позвоночнике

Fig. 1. Location of sensors on the spine

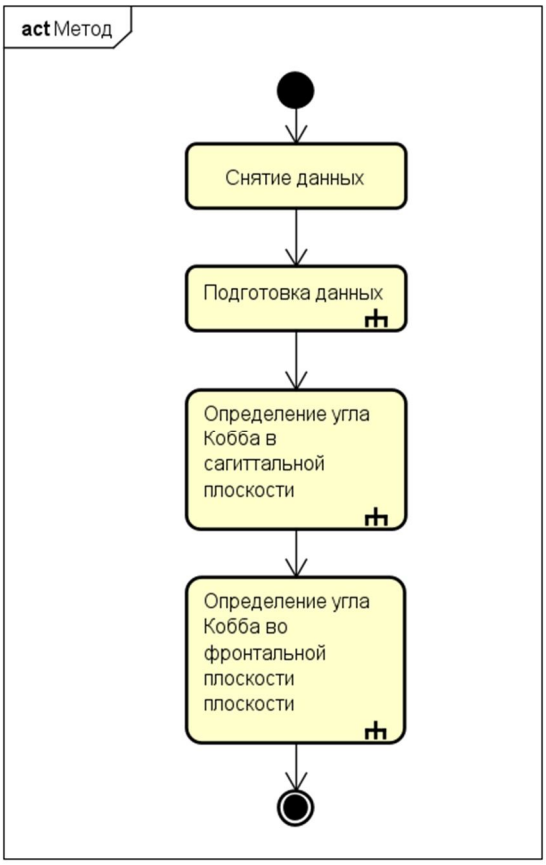


Рис. 2. Схема алгоритма метода оценки кривизны позвоночника в сагиттальной и фронтальной плоскостях

Fig. 2. Scheme of the algorithm for estimating the curvature of the spine in the sagittal and frontal planes

Подготовка данных осуществляется за счет удаления начальных строк данных в связи с тем, что при включении системы синхронизация датчиков происходит не сразу, а спустя некоторое время, которое все равно записывается в основной массив данных. Такие несинхронизированные датчики легко выделить среди уже работающих, если посмотреть на сами значения их координат: у еще не подключившихся датчиков всегда совпадают две крайние координаты, а именно x и z (рис. 3).

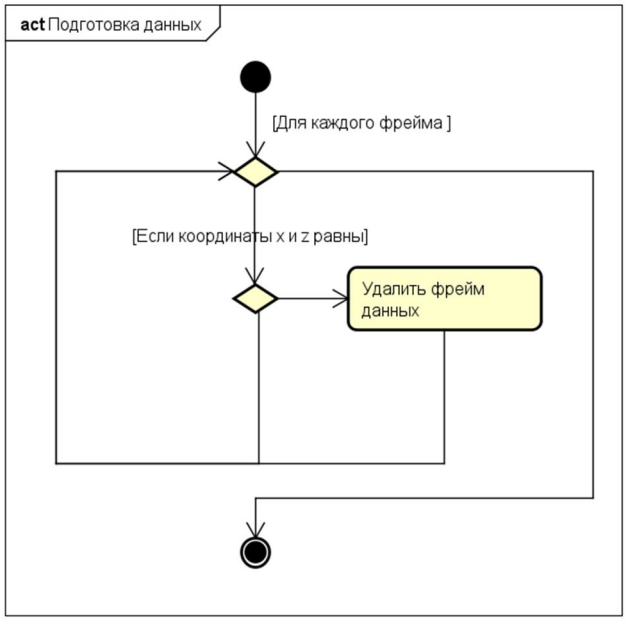


Рис. 3. Схема подготовки данных

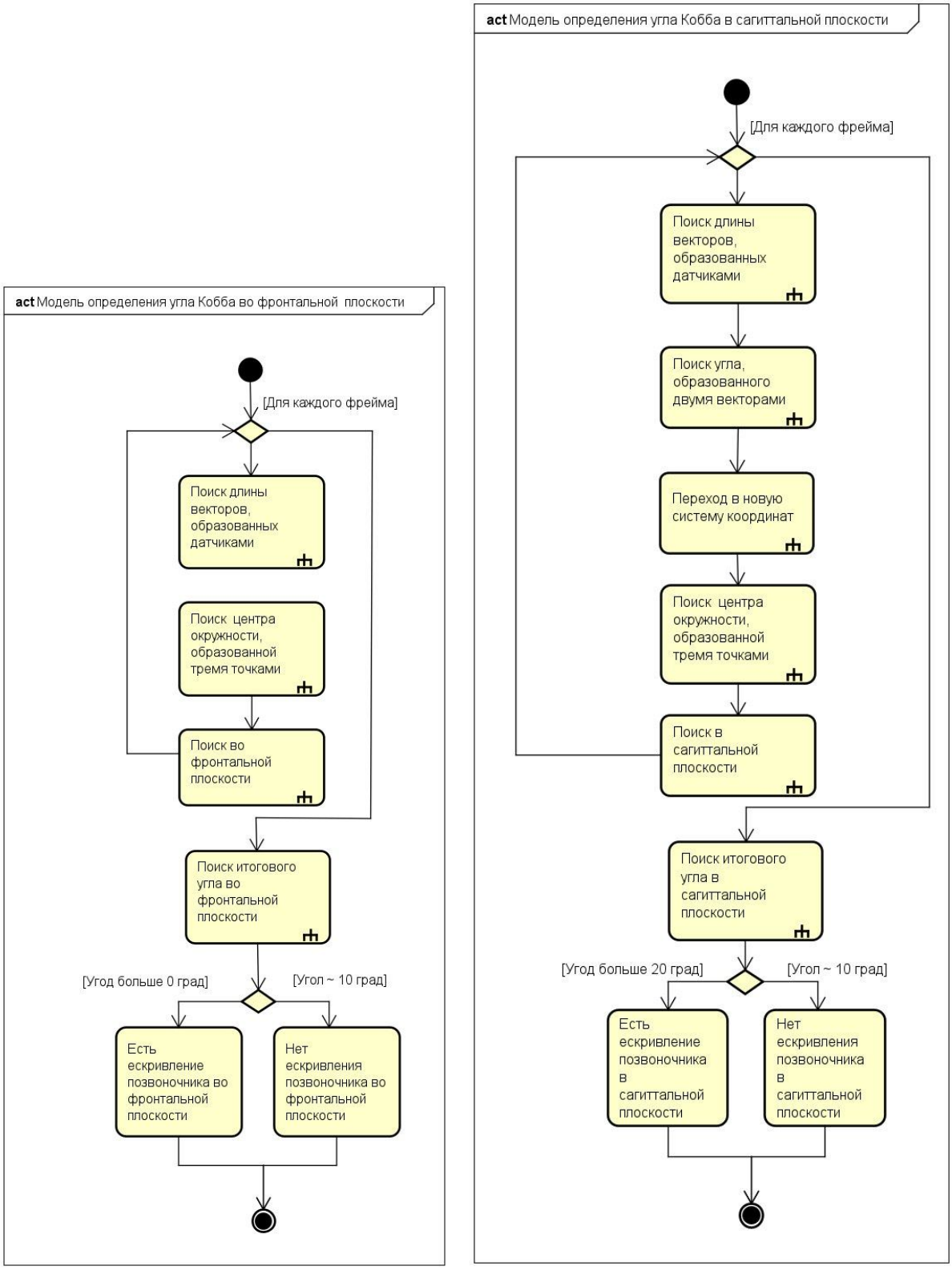
Fig. 3. Data preparation scheme

Последним этапом является обработка подготовленных данных и поиск необходимых углов. Рассмотрим модели определения угла Кобба (рис. 4).

Модель работает следующим образом: сперва ищется угол в сагиттальной плоскости, для чего для каждого фрейма данных находится длина векторов, образованных датчиками, а именно длина вектора BC и BA, после чего на основании формул (1)–(2) находится угол, образованный данными векторами, что делается для более простого и быстрого перехода к новой двумерной системе координат.

$$|\vec{AB}| = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}. \quad (1)$$

$$\boldsymbol{Angle} = \boldsymbol{acos}\left(\frac{(x_a - x_b)\cdot(x_c - x_b) + (y_a - y_b)\cdot(y_c - y_b)}{\sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}\right). \quad (2)$$



а) б)

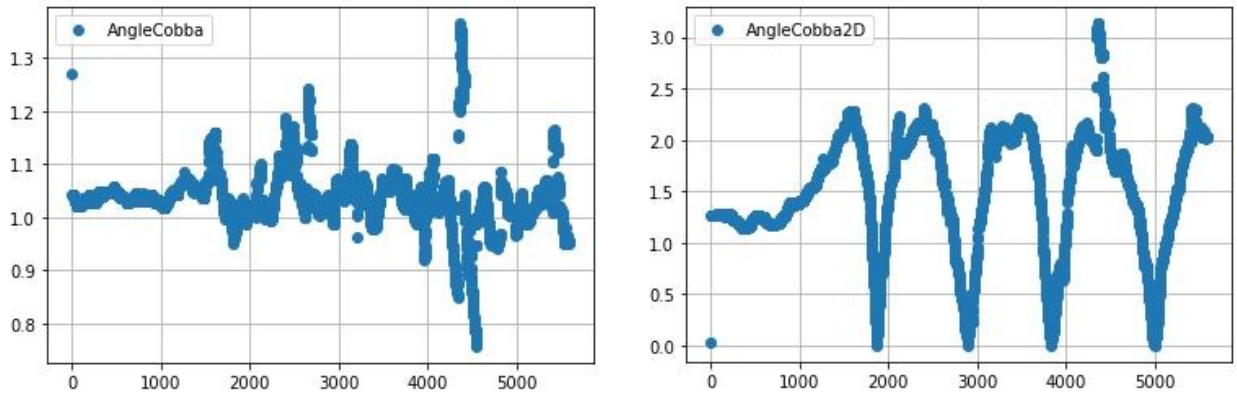
Рис. 4. Модели определения угла Кобба во фронтальной плоскости (а) и в сагиттальной плоскости (б)

Fig. 4. Models for determining the Cobb angle in the frontal plane (a) and in the sagittal plane (б)

Решение использовать двумерную систему координат обосновывается упрощением вычислений для поиска центра окружности. Затем на основании полученных данных ищется сам центр окружности (3):

$$\begin{cases} x_0 = -\dfrac{1}{2}\dfrac{y_1\cdot\left(x_2^2-x_3^2+y_2^2-y_3^2\right)+y_2\cdot\left(-x_1^2+x_3^2-y_1^2+y_3^2\right)+y_3\cdot\left(x_1^2-x_2^2+y_1^2-y_2^2\right)}{x_1\left(y_2-y_3\right)+x_2\left(y_3-y_1\right)+x_3\left(y_1-y_2\right)}, \\ y_0 = \dfrac{1}{2}\dfrac{\left(x_1\cdot\left(x_2^2-x_3^2+y_2^2-y_3^2\right)+x_2\cdot\left(-x_1^2+x_3^2-y_1^2+y_3^2\right)+x_3\cdot\left(x_1^2-x_2^2+y_1^2-y_2^2\right)}{x_1\left(y_2-y_3\right)+x_2\left(y_3-y_1\right)+x_3\left(y_1-y_2\right)}. \end{cases} \quad (3)$$

Далее на основании формулы (2) определяется угол между векторами OA и OC, и таким образом находится угол в сагиттальной плоскости для каждого момента времени. На основании этих данных впоследствии строятся графики, которые дают нам понять в первом приближении о кинематике позвоночника в процессе ходьбы (рис. 5, а). Как видно из графиков по изменению данного угла, можно напрямую говорить о динамике позвоночного столба.



а) б)

Рис. 5. Графики динамики движения позвоночника и сагиттального и фронтального углов

Fig. 5. Graphs of the dynamics of the movement of the spine and the sagittal and frontal angles

После ищется угол во фронтальной плоскости (см. рис. 4, а), для чего для каждого фрейма данных находится проекции векторов BC и BA на плоскость, после чего вновь находится центр окружности и вычисляется угол между векторами OAp и OBp (рис. 5, б).

Впоследствии при желании можно получить графики движения датчиков в пространстве и на основании их сделать вывод о движении позвоночника во время процесса ходьбы. И в заключение сделать вывод о том, есть ли у человека искривление позвоночника или нет.

Программный комплекс

Весь программный комплекс состоит из трёх основных модулей:

1) модуль считывания данных на базе игрового движка Unity;

2) модуль анализа наличия кривизны позвоночника;

3) модуль визуализации данных проекция движения датчиков во время ходьбы для отслеживания изменения угла кривизны позвоночника.

На основании приведенной ниже диаграммы случаев использования (рис. 6) можно понять, что разработанная система не только позволяет получить более точный диагноз, но и автоматически высчитывает углы грудного сколиоза и кифоза, а также предоставляет возможность на основании динамики движения позвоночника сделать заключение о состоянии и подвижности самого позвоночника и, пожалуй, исключить какие-либо побочные заболевания.

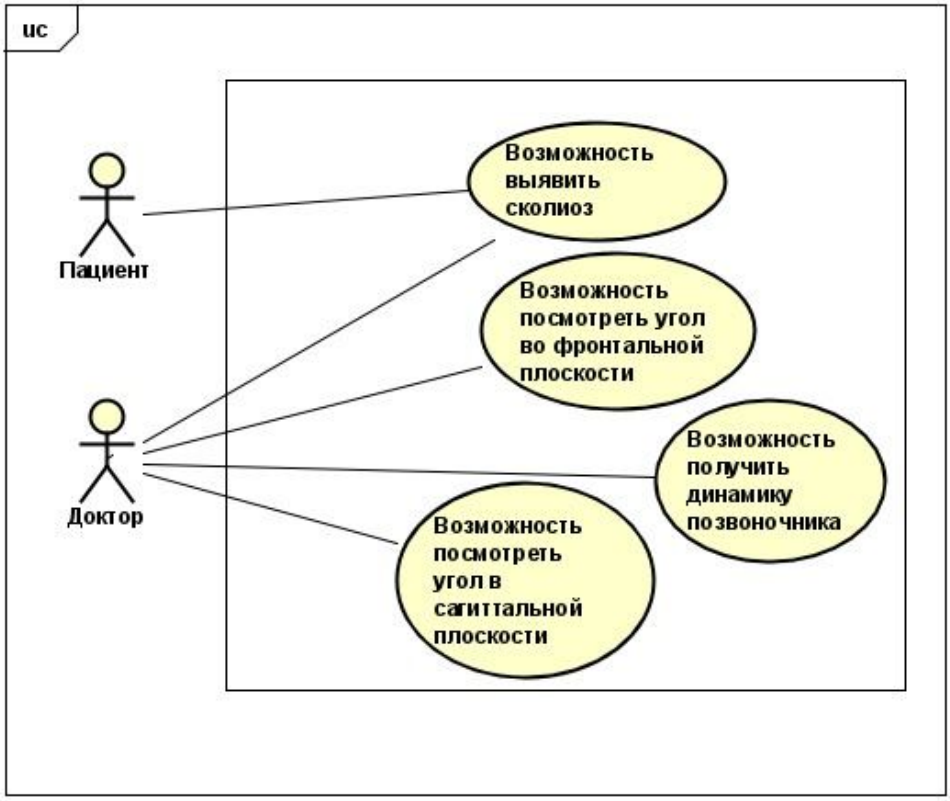


Рис. 6. Диаграмма случаев использования

Fig. 6. Usage case diagram

В целом весь процесс работы системы можно увидеть на следующей диаграмме (рис. 7). При использовании системы определения кривизны позвоночника появляется возможность получить необходимую информация уже исходя из простой походки пациента, для чего врачу потребуется всего лишь использовать систему захвата движения, в которой пациенту необходимо будет пройтись по специальному ковру с датчиками для фиксирования динамики движения позвоночника. После чего в ход пойдет программа, которая на основании заложенных в нее алгоритмов не

только определит, насколько искривлен позвоночник, но и также выдаст графики динамики. Если рассматривать подробно, то становится видно, что данные в процессе проходят фильтрацию, чтобы избавиться от невалидных данных, которые способны повлиять на итоговый результат вычисления, после чего вычисляется сама величина угла Кобба. При правильно произведенной фильтрации выбросов обычно не наблюдается, что впоследствии легко можно видеть на графиках динамики движения позвоночника и изменения угла Кобба.

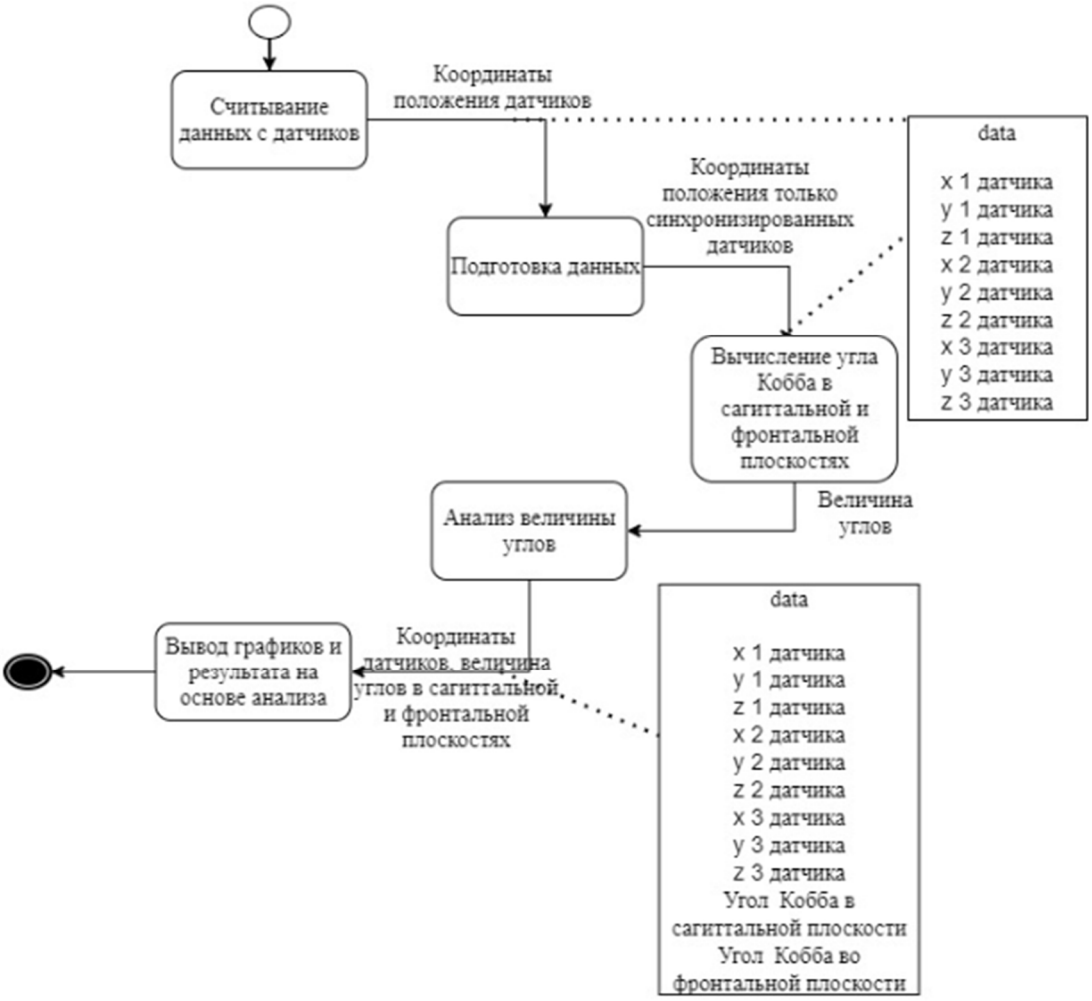


Рис. 7. Диаграмма потоков данных

Fig. 7. Data flow diagram

Результаты и их обсуждение

Была проведена серия экспериментов, участниками которой стали 10 добровольцев, разделенные на 2 группы. В первой группе находились люди, у которых было зафиксировано нарушение осанки и был подтвержден диагноз сколиоз. Во второй – были добровольцы без сколиоза. В целом на данный момент модель имеет погрешность в 2–3°, что укладывается в допустимый предел погрешности.

Затем изучалась динамика изменения высчитанных углов (см. рис. 5), на основании чего можно было в целом сделать заключение о различиях в походке у людей со сколиозом и без.

На основании приведенных выше данных можно сделать окончательное заключение, что у людей со сколиозом в целом более большой разброс в движениях верхнего грудного отдела.

Метод оценки кривизны позвоночника, приведенный в данной статье, еще находится на стадии разработки и имеет ряд недостатков. Например, малое количество датчиков, которое не позволяет еще больше уточнить полученные результаты и учесть влияние всех факторов, в то время как в работах ряда аналогов большее число маркеров позволяет изучать не только сколиоз грудного и шейно-грудного отдела в двух плоскостях, но и одновременно с этим затронуть еще и поясничный отдел. Данные и графики, полученные в ходе апробации разработанных метода и модели, однако, все же согласуются с реальностью. Особенно хорошо это можно видеть на рисунке 5, б, где приведена динамика изменения угла Кобба в сагиттальной плоскости.

Выводы

Разработанный метод определения наличия кривизны позвоночника на данном этапе позволяет сказать, есть ли у человека сколиоз, а также уточнить меру искривления в двух плоскостях – сагиттальной и фронтальной. Алгоритм находится на стадии разработки и усовершенствования. В перспективе при большем количестве датчиков возможно достижение большей точности получаемых на выходе данных, а также увеличение числа параметров, снятие которых будет возможно уже при 12 маркерах.

Также можно отметит, что разработанный метод определения наличия кривизны позвоночника в перспективе способен заменить рентген на первых трех стадиях развития сколиоза, исключая лишь четвертую, когда требуется хирургическое вмешательство в процесс лечения, т. е. имеется большая вероятность того, что система сможет заменить как рентген, так и МРТ и КТ в тех случаях, когда речь идет лишь об искривлении позвоночника.

На данном этапе проводятся тестирования и доработка разработанной методики на добровольцах.

Список литературы

1. Клинические рекомендации. Идиопатический сколиоз. URL: http://www. kokb45/ ru>wp…2018/06/idiopaticheskij-skolioz.pdf (дата обращения: 30.11.2020).

2. Зайдман А. М. Что же такое идиопатический сколиоз? // Хирургия позвоночника. 2016. Т. 13, № 4. С. 104–110.

3. Comparison of two- and three-dimensional measurement of the Cobb angle in scoliosis / R. Lechner, D. Putzer, D. Dammerer [et al.] // International Orthopaedics. 2016. N 41(5). 6 p.

4. Prediction of Cobb-angle for Monitoring System in Adolescent Girls with Idiopathic Scoliosis using Multiple Regression Analysis / Eun Ji Seo [et al.] // Journal of Biosystems Engineering. 2013. Vol. 38, N 1. P. 64–71.

5. Автоматическая система определения углов сколиотической деформации позвоночника человека / М. А. Падалко, С. В. Орлов, А. М. Наумов [и др.] // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2019. № 3. С. 55–68.

6. Алгоритм трехплоскостной рентгенологической диагностики деформации позвоночника при сколиозе / Д. К. Тесаков, С. В. Макаревич, Д. Д. Тесакова [и др.] / Белорусский государственный медицинский университет. Минск, 2008. 14 с.

7. Дабагов А. Р., Бугаев А. С. Автоматический классификатор рентгеновских изображений с использованием масок прозрачности // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2019. Т. 9, № 4. С. 106–125.

8. Компьютерные технологии для развития детей с заболеваниями нервной системы и опорно-двигательного аппарата / Е. В. Ершов, Л. Н. Виноградова, И. А. Варфоломеев, С. В. Пыж, В. М. Осколков, Т. В. Ершова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 88–96.

9. Measurement of scoliosis Cobb angle by end vertebra tilt angle method / J. Wang, J. Zhang, R. Xu [et al.] // J. Orthop Surg Res. 2018. N 13. P. 7.

10. Measuring angles on digitalized radiographic images using Microsoft PowerPoint / J. K., A. Krow, S. Hariharan [et al.] // West Indian Med. J. 2008. N 57(1). P. 14–19.

11. Reliability of novice physiotherapists for measuring Cobb angle using a digital method / P. Suwannarat, P. Wattanapan, A. Wiyanad [et al.] // Hong Kong Physiother J. 2017. N 37. P. 34–38.

12. Lumbar spine kinematics during walking in people with and people without low back pain / S. P. Gombatto, T. Brock, A. DeLork [et al.] // Gait Posture. 2015. Vol. 42. P. 539–544.

13. Comparison of two- and three-dimensional measurement of the Cobb angle in scoliosis / R. Lechner, D. Putzer, D. Dammerer [et al.] // International Orthopaedics (SICOT) 2017. N 41. P. 957–962.

14. Using Skin Markers for Spinal Curvature Quantification in Main Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis: An Explorative Radiographic Study / S. Schmid, D. Studer, C.-C. Hasler [et al.] // PLoS ONE. 2015. N 10(8). P. 1–12.

15. Сарнадский В. Н., Вильбергер С. Я., Фомичев Н. Г.. Анализ кинематики туловища и позвоночника в процессе ходьбы методом компьютерной оптической топографии. Пилотные исследования // Биомедприбор 2000: труды Международной конференции по биомедицинскому приборостроению. М.: ВНИИМП–ВИТА, 2000. Т. 1, С. 65–71.

16. Скоблин А. А., Витензон А. С., Алексеенко И. Г. Биомеханические параметры ходьбы у больных идиопатическим сколиозом II-III степени // Хирургия позвоночника. 2007. № 4. С. 35–40.

17. Тесаков Д. К. Рентгенологические методики измерения дуг сколиотической деформации позвоночника во фронтальной плоскости и их сравнительный анализ // Проблемы здоровья и экологии. 2007. № 3. С. 94–103.

18. Development of 3D human body model / V. M. Konstantinov, V. L. Rozaliev, Y. A. Orlova [et al.] // Intelligent Information Technologies for Industry: Proceedings of the First International Scientific Conferens, 2016. P.143–152.

19. Methods and applications for controlling the correctness of physical exercises performance / V. L. Rozaliev, A. I. Vybornyi, Y. A. Orlova [et al.] // Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2210. P. 344–351.

20. Quantifying Spinal Gait Kinematics using an Enhanced Optical Motion Capture Approach in Adolescent Idiopathic Scoliosisм / S. Schmid, D. Studer, C-C. Hasler [et al.] // Gait and Posture. 2015. N 44. P. 12.

References

1. Klinicheskie rekomendatsii. Idiopaticheskii skolioz [Clinical recommendations. Idiopathic scoliosis]. Available at: http://www.kok645/en>wp...2018/06/idiopaticheskij-skolioz.pdf. (accessed 30.11.2020)

2. Zaidman A. M. Chto zhe takoe idiopaticheskii skolioz? [What is idiopathic scoliosis?]. *Khirurgiya pozvonochnika = Spinal Surgery*, 2016, vol. 13, no. 4, pp. 104–110.

3. Lechner R., Putzer D., Dammerer D., eds. Comparison of two - and three-dimensional measurement of the Cobb angle in scoliosis. *International Orthopaedics*, 2016, no. 41(5). 6 p.

4. Eun Ji Seo, eds. Prediction of Cobb-angle for Monitoring System in Adolescent Girls with Idiopathic Scoliosis using Multiple Regression Analysis. *Journal of Biosystems Engineering*, 2013, vol. 38, no. 1, pp. 64–71.

5. Padalko M. A., Orlov S. V., Naumov A. M., eds. Avtomaticheskaya sistema opredeleniya uglov skolioticheskoi deformatsii pozvonochnika cheloveka [Automatic system for determining the angles of scoliotic deformation of the human spine]. *Vestnik Baltiiskogo*

federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Baltic Federal University named after I. Kant. Series: Physical-Mathematical and Technical Sciences, 2019, no. 3, pp. 55–68.

6. Tesakov D. K., Makarevich S. V., Tesakova D. D., eds. Algoritm trekhploskostnoi rentgenologicheskoi diagnostiki deformatsii pozvonochnika pri skolioze [The algorithm of three-plane X-ray diagnostics of spinal deformity in scoliosis]. Minsk, Belarusian State Medical University Publ., 2008. 14 p.

7. Dabagov A. R., Bugaev A. S. Avtomaticheskii klassifikator rentgenovskikh izobrazhenii s ispol'zovaniem masok prozrachnosti [Automatic classifier of X-ray images using transparency masks]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*, 2019, vol. 9, no. 4. pp. 106–125.

8. Yershov E. V., Vinogradova L. N., Varfolomeev I. A., Pyzh S. V., Oskolkov V. M., Yershova T. V. Komp'yuternye tekhnologii dlya razvitiya detei s zabolevaniyami nervnoi sistemy i oporno-dvigatel'nogo apparata [Computer technologies for the development of children with diseases of the nervous system and the musculoskeletal system]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering,* 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 88–96.

9. Wang J., Zhang J., Xu R., eds. Measurement of scoliosis Cobb angle by end vertex tilt angle method. *J. Orthop Surg Res*, 2018, no. 13. P. 7.

10. J. K., Krow A., Hariharan S., eds. Measuring angles on digitalized radiographic images using Microsoft PowerPoint. *West Indian Med. J.*, 2008, no. 57(1), pp. 14–19.

11. Suwannarat P., Wattanapan P., Wiyanad A., eds. Reliability of novice physiotherapists for measuring the Cobb angle using a digital method. *Hong Kong Physiother J.*, 2017, no. 37, pp. 34–38.

12. Gombatto S. P., Brock T., DeLork A., eds. Lumbar spine kinematics during walking in people with and people without low back pain. *Gait Posture*, 2015, vol. 42, pp. 539–544.

13. Lechner R., Putzer D., Dammerer D., eds. Comparison of two - and three-dimensional measurement of the Cobb angle in scoliosis. *International Orthopaedics (SICOT)*, 2017, no. 41, pp. 957–962.

14. Schmid S., Studer D., Hasler C.-C., eds. Using Skin Markers for Spinal Curvature Quantification in Main Thoracic Adolescent Idiopathic Scoliosis: An Explorative Radiographic Study. *PLoS ONE*, 2015, no. 10(8), pp. 1–12.

15. Sarnadsky V. N., Wilberger S. Ya., Fomichev N. G. [Analysis of the kinematics of the trunk and spine in the process of walking by computer optical topography. Pilot studies]. Biomedpribor 2000. Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po biomeditsinskomu priborostroeniyu [Biomedpribor 2000. Proceedings of the International Conference on Biomedical Instrumentation]. Moscow, VNIIMP-VITA Publ., 2000, vol. 1, pp. 65–71. (In Russ.)

16. Skoblin A. A., Vitenzon A. S., Alekseenko I. G. Biomekhanicheskie parametry khod'by u bol'nykh idiopaticheskim skoliozom II-III stepeni [Biomechanical parameters of walking in patients with idiopathic scoliosis of the II-III degree]. *Khirurgiya pozvonochnika = Spine Surgery*, 2007, no. 4, pp. 35–40.

17. Tesakov D. K. Rentgenologicheskie metodiki izmereniya dug skolioticheskoi deformatsii pozvonochnika vo frontal'noi ploskosti i ikh sravnitel'nyi analiz [Radiological methods of measuring the arcs of scoliotic spinal deformity in the frontal plane and their comparative analysis]. *Problemy zdorov'ya i ekologii = Health and Environmental Issues,* 2007, no. 3, pp. 94–103.

18. Konstantinov V. M., Rozaliev V. L., Orlova Y. A., eds. Development of 3D human body model. Intelligent Information Technologies for Industry: Proceedings of the First International Scientific Conferences, 2016, pp. 143–152.

19. Rozaliev V. L., Vybornyi A. I., Orlova Y. A., eds. Methods and applications for controlling the correctness of physical exercises performance. Paper presented at the CEUR Workshop Proceedings, 2018, vol. 2210, pp. 344–351.

20. Schmid S., Studer D., Hasler C.-C., eds. Quantifying Spinal Gait Kinematics using an Enhanced Optical Motion Capture Approach in Adolescent Idiopathic Scoliosisм. *Gait and Posture*, 2015, no. 44, p. 12.

Информация об авторах / Information about the Authors

Донская Анастасия Романовна, магистр,
Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград,
Российская Федерация,
e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru

Anastasia R. Donskaya, Master's Degree,
Volgograd Technical State University,
Volgograd, Russian Federation,
e-mail: donsckaia.anastasiya@yandex.ru

Орлова Юлия Александровна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой программного обеспечения автоматизированных систем, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: poas@vstu.ru

Yulia A. Orlova, Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Software for Automated Systems, Volgograd Technical State University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: poas@vstu.ru

Розалиев Владимир Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Vladimir L. Rosaliev, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Systems Computer-Aided Design and Search Engine Design, Volgograd Technical State University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: vladimir.rozaliev@gmail.com

Зыков Дмитрий Станиславович, старший преподаватель, Волгоградский технический государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация, e-mail: Vash-business34@yandex.ru

Dmitry S. Zykov, Senior Lecturer, Volgograd Technical State University, Volgograd, Russian Federation, e-mail: Vash-business34@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 616-003.6

Математические модели прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы у работников, контактирующих с промышленными ядохимикатами

С. Н. Родионова[1] ✉, В. В. Аксёнов[1], Д. А. Медников[1], Р. И. Сафронов[2]

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

[2] Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова
ул. Карла Маркса 70, г. Курск 305021, Российская Федерация

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Резюме

Целью исследования *является разработка моделей прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы на производствах с ядохимикатами в рабочей зоне, обеспечивающих приемлемое для профилактической медицины качество принятия решений.*

Методы. *С учетом данных разведочного анализа в качестве основного метода исследования выбрана методология синтеза гибридных нечетких решающих правил, ориентированная на синтез решающих правил в условиях высокой степени неопределенности в структуре анализируемых данных, которая была модифицирована с учетом особенности действия производственных ядохимикатов на состояние здоровья человека. В синтезируемых моделях учитываются мультипликативные и нелинейные эффекты взаимодействия вредных химических веществ, присутствующих в рабочей зоне с различными структурами организма, что позволило значительно повысить качество принимаемых решений.*

Результаты. *В ходе проведенных исследований получены модели прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы у рабочих гальванических цехов предприятий Курской области. В полученных нечетких моделях учитывались производственные факторы риска совместно с вредными воздействиями эргономики и экологии гальванических цехов и индивидуальным состоянием здоровья работников.*

В результате статистических испытаний и математического моделирования было установлено, что при прогнозировании уверенность в принимаемом решении превышает величину 0,85, а уверенность в донозологической стадии заболевания – 0,9.

Заключение. *Полученные модели прогнозирования и донозологической диагностики бронхиальной астмы в условиях трудовой деятельности работников гальванических цехов обеспечивают требуемые для профилактической медицины показатели качества принимаемых решений в условиях недостаточной статистики при плохоформализуемой структуре данных.*

Ключевые слова: *математические модели; бронхиальная астма; прогноз; ранняя диагностика; промышленные ядохимикаты; нечеткая логика принятия решений.*

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

© Родионова С. Н., Аксёнов В. В., Медников Д. А., Сафронов Р. И., 2021

Для цитирования: Математические модели прогнозирования и ранней диагностики бронхиальной астмы у работников, контактирующих с промышленными ядохимикатами / С. Н. Родионова, В. В. Аксёнов, Д. А. Медников, Р. И. Сафронов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 129–143.

Поступила в редакцию 15.01.2021 *Подписана в печать 14.02.2021* *Опубликована 30.03.2021*

Mathematical Models for Predicting and Early Diagnosis of Bronchial Asthma in Workers Exposed to Industrial Pesticides

Sofia N. Rodionova[1] ✉, Vitaliy V. Aksenov[1], Dmitry A. Mednikov[1], Ruslan I. Safronov[2]

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

[2] Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov
70 Karl Marx str., Kursk 305021, Russian Federation

✉ e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Abstract

The purpose of reseach *to develop models for predicting and early diagnosis of bronchial asthma in production facilities with toxic chemicals in the work area, which provide an acceptable quality of decision-making for preventive medicine.*

Methods. *Based on the data exploratory analysis as the primary method of investigation was the methodology for the synthesis of a hybrid fuzzy decision rules focused on the synthesis of decision rules under conditions of high uncertainty in the structure of the analyzed data that was modified taking into account peculiarities of the effect of industrial chemicals on human health. The synthesized models take into account the multiplicative and nonlinear effects of interaction of harmful chemicals present in the work area with various structures of the body, which significantly improves the quality of decisions made.*

Results. *In the course of the research, models were obtained for predicting and early diagnosis of bronchial asthma in workers of electroplating workshops of enterprises in the Kursk region. The resulting fuzzy models took into account production risk factors together with the harmful effects of ergonomics and ecology of electroplating shops and the individual health status of employees.*

As a result of statistical tests and mathematical modeling, it was found that when predicting confidence in the decision made exceeds the value of 0.85, and confidence in the pre - nosological stage of the disease-0.9.

Conclusion. *The obtained models of forecasting and pre-nosological diagnostics of bronchial asthma in the conditions of labor activity of employees of electroplating shops provide the quality indicators of decisions made required for preventive medicine in conditions of insufficient statistics and poorly formalized data structure.*

Keywords: *mathematical models; bronchial asthma; prognosis; early diagnosis; industrial pesticides; fuzzy logic of decision-making.*

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

For citation: Rodionova S. N., Aksenov V. V., Mednikov D. A., Safronov R. I. Mathematical Models for predicting and Early Diagnosis of Bronchial Asthma in Workers Exposed to Industrial Pesticides. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 129–143. (In Russ.)

Received 15.01.2021 *Accepted 14.02.2021* *Published 30.03.2021*

Введение

Значительная доля производственных процессов содержит в воздухе рабочей зоны промышленные ядохимикаты. Например, в процессе гальванической обработки деталей в воздухе рабочей зоны образуются вредные пары, газы, брызги электролитов и др., приводящие к таким заболеваниям, как астма, язва желудка и двенадцати перстной кишки, слепота и т. д. [1; 2; 3; 4; 5].

Большинство работ по профпатологии и социальной гигиене, включая заболевания, вызываемые промышленными ядохимикатами, используют для принятия решений данные статистического анализа заболеваемости, не учитывая множества других динамических и существенных экзогенных и эндогенных факторов риска. Проведенный нами анализ показал, что при таком подходе задачи прогнозирования и донозологической диагностики профессиональных заболеваний, включая исследуемый класс патологий, не решаются с требуемой для практической медицины точностью.

В то же время накопленный на кафедре биомедицинской инженерии опыт показал, что приемлемое для медицинской практики качество принятия решений при прогнозировании и диагностике профессиональных болезней обеспечивается, если при синтезе математических моделей прогнозирования, донозологической и дифференциальной диагностики профессиональных заболеваний использовать методологию синтеза гибридных нечетких решающих правил (МСГНРП) [6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17].

Материалы и методы

С учетом специфики факторов риска на предприятиях с достаточно высокой концентрацией промышленных ядохимикатов предлагается определенным образом модифицировать МСГНРП, обеспечив совместный учет производственных, экологических и индивидуальных факторов риска [11; 14, 18; 19]. Предлагаемая модификация сформулирована в виде следующей последовательности действий:

1. Формируется экспертная группа врачей профпатологов во главе с инженером-когнитологом. Состав группы корректируется в соответствии с требованиями квалиметрии и обучается применению МСГНРП.

2. Если имеется возможность определения резистентных концентраций и формирования репрезентативных обуча-

ющих выборок, то с помощью модифицированного метода группового учета аргументов модификации (МГУА) [9; 11; 14; 20] для выбранного вредного химического вещества h_i определяют базовые переменные, учитывающие его концентрацию c_i и время воздействия t_i по формуле

$$z_{\ell i} = f_{\ell i}\left(\frac{c_i}{c_{pi}}\right) \cdot f^*_{\ell i}\left(\frac{t_i}{t_{pi}}\right), \qquad (1)$$

где c_{pi} – резистентная концентрация химического вещества (ХВ) h_i, ниже которой обеспечивается безопасность функционирования органа по заболеванию ω_ℓ; i = 1, 2, …, n, l = 1, 2, …, L; t_{pi} – резистентное время формирования патологии ω_ℓ; $f_{\ell i}(\cdot)$ – нормировочная функция степени влияния ХВ по заболеванию с областью определения [0, …, 1]; $f^*_{\ell i}(\cdot)$ – нормировочная функция по времени воздействия ХВ h_i для патологии ω_ℓ с той же областью определения, что и $f_{\ell i}(\cdot)$.

Используя рекомендации [19], определяются функции принадлежности $\mu^d_\ell(z_{\ell i})$ для классов ω_ℓ по задачам с именем d (d = п – прогноз; d = р – ранняя (донозологическая) стадия исследуемой патологии; d = д – диагноз для клинически проявляемого заболевания).

3. Синтезируется частная прогностическая модель оценки уверенности $UHR^{\text{п}}_\ell$ в появлении и развитии исследуемых классов заболеваний в зависимости от наличия в воздухе рабочей зоны вредных химических веществ:

$$UHR^{\text{п}}_\ell = Ag^{\text{п}}_\ell[\mu^{\text{п}}_\ell(z_{\ell i})], \qquad (2)$$

где $Ag^{\text{п}}_\ell$ – агрегирующая функция для задачи п по классу ω_ℓ; ℓ=1, 2, …, i = 1, 2, …

4. Уверенность в донозологическом диагнозе по классу (профпатологии) ω_ℓ определяется нечетким выражением вида

$$UHR^{\text{р}}_\ell = Ag^{\text{р}}_\ell[\mu^{\text{р}}_\ell(z_{\ell i})], \qquad (3)$$

где $Ag^{\text{р}}_\ell$ – агрегирующая функция для задачи р по классу ω_ℓ.

Синтез функций принадлежности и их агрегация выполняются с использованием алгоритмов МСГНРП [6; 7; 10; 11; 12; 16; 21].

5. При использовании средневзвешенных концентраций выбираются нечеткие модели вида

$$z_{\ell i} = f_{\ell i}\left(\frac{c_i}{c_{\Pi i}}\right) \cdot f^*_{\ell i}(t_i), \qquad (4)$$

где $c_{\Pi i}$ – предельно-допустимая концентрация ХВ h_i.

Повысить точность моделей (2) и (3) можно, задав меры доверия к прогностическим DП и диагностическим DP решающим правилам с синтезом частных математических моделей вида:

$$UHR_{\ell}^{\text{п}} = Ag_{\ell}^{\text{п}}[\mu_{\ell}^{\text{п}}(z_{\ell i}, DП)], \qquad (5)$$

$$UHR_{\ell}^{\text{р}} = Ag_{\ell}^{\text{р}}[\mu_{\ell}^{\text{р}}(z_{\ell i}, DP)]. \qquad (6)$$

Нормировочные функции для формулы (4) и функции принадлежности формул (5) и (6) могут быть получены экспертами без использования МГУА, руководствуясь рекомендациями МСГНРП [6; 7; 10; 11; 12; 221].

6. Наиболее простым способом синтеза решающих правил является построение нечетких решающих таблиц, по строкам которых выписываются химические вещества h_i, а столбцы, состоящие из двух блоков задают интервал Δr отношений концентраций к ПДК ($\Delta r = c_{r-1}/c_{\text{п}} - c_r/c_{\text{п}}$) и интервалы времени Δt, в течение которых работники находятся под воздействием промышленных ядохимикатов (табл.).

Таблица. Таблица коэффициентов уверенности для класса ω_{ℓ}

Table. Table of confidence coefficients for a class ω_{ℓ}

$\Delta r, \Delta t$ / h_i	Δr_1	...	Δr_{mr}	Δt_1	...	Δt_{mt}
h_1	U_{11}	...	U_{1mr}	γ_{11}	...	γ_{1mt}
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
h_n	U_{n1}	...	U_{nmr}	γ_{n1}	...	γ_{nmt}

Элементы первого блока задают уверенность U_{iq} в том, что при воздействии фактора h_i появятся патологии ω_{ℓ} (q – номер итерации Δr).

Во втором блоке задаются временные поправочные коэффициенты γ_{ip}, уточняющие уверенности U_{iq} в зависимости от времени воздействия факторов h_i (р – номер интервала Δt).

Для химического вещества h_i (строка таблицы) уверенность в ω_{ℓ} определяется по формуле

$$US_{\ell i} = U_{iq} \cdot \gamma_{ip}. \qquad (7)$$

Уверенность в ω_{ℓ} от совокупности воздействия всех выбранных химических факторов определяется по формуле

$$UHR_{\ell}^{\text{d}} = F_{\ell}\,[U_{iq} \cdot \gamma_{ip}], \qquad (8)$$

где F_ℓ – соответствующая функция агрегации; $d = \text{п}$.

7. В соответствии с общими рекомендациями МСГНРП по классам ω_ℓ определяются все существенные факторы риска и по ним синтезируются гибридные финальные решающие правила вида

$$UF_\ell^d = Ag_\ell^d[UHR_\ell^d, UFR_\ell^d], \qquad (9)$$

Таким образом, синтезируются прогностические и диагностические решающие правила, «работающие» с приемлемой для практической медицины точностью.

Результаты и их обсуждение

В качестве примера решается задача синтеза гибридных синтез моделей прогнозирования и донозологической диагностики бронхиальной астмы у работников гальванических цехов (класс $\omega_Б$ для прогнозирования и класс $\omega_{БР}$ – для раннего диагноза).

Для этого производства основным фактором риска по бронхиальной астме (БА) является наличие в воздухе рабочей зоны диоксида серы (концентрация $C_З$, ПДК $C_{ПЗ}$). По этому показателю получены нормировочные функции вида:

$$f_{БЗ}(x_З) = \begin{cases} 0,041(x_З)^2, & \text{если} \quad x_З < 3,5; \\ 1 - 0,041(x_З - 7)^2, & \text{если} \quad 3,5 \le x_З < 7; \\ 1,0, & \text{если} \quad x_З \ge 7, \end{cases}$$

$$f_З^*(t) = \begin{cases} 0, & \text{если} \quad t < 2; \\ 0,003(t-2)^2, & \text{если} \quad 2 \le t < 15; \\ 1 - 0,003(t-28)^2, & \text{если} \quad 15 \le t < 28; \\ 1, & \text{если} \quad t \ge 28. \end{cases}$$

где $x_З = C_З / C_{ПЗ}$; $z_Б = f_{БЗ}(C_З / C_{ПЗ}) \cdot f_З^*(t)$.

Соответствующая функция принадлежности определяется выражением

$$\mu_Б^П(Z_Б) = \begin{cases} 0, \text{ если } Z_Б < 0,1; \\ 2,19(Z_Б - 0,1)^2, \text{ если } 0,1 \le Z_Б < 0,5; \\ 0,7 - 2,19(Z_Б - 0,9)^2, \text{если } 0,5 \le Z_Б < 0,9; \\ 0,7, \text{ если } Z_Б \ge 0,9. \end{cases}$$

Для одного фактора риска модель (5) принимает вид

$$UHR_Б^П = \mu_Б^П(Z_Б).$$

Остальные составляющие модели (10) определяются в соответствии с общими рекомендациями МСГНРП. Для прогностической модели для бронхиальной астмы получена нечеткая модель вида

$$UF_Б^П(q+1) = \\ = UF_Б^П(q) + Q_Б^П(q+1)[1 - UF_Б^П(q)], \qquad (10)$$

где $UF_{Б}^{П}(1) = Q_{Б}^{П}(1) = UHR_{Б}^{П}$;

$Q_{Б}^{П}(2) = UO_{Б}^{П}$;

$Q_{Б}^{П}(3) = \mu_{Б}^{П}(UF_{Б}^{П})$; $Q_{Б}^{П}(4) = \mu_{Б}^{П}(y_2)$;

$Q_{Б}^{П}(5) = \mu_{Б}^{П}(y_3)$; $Q_{Б}^{П}(6) = \mu_{Б}^{П}(y_4)$;

$Q_{Б}^{П}(7) = \mu_{Б}^{П}(y_5)$; $Q_{Б}^{П}(8) = \mu м(y_6)$.

В выражении (11):

$Q_{Б}^{П}(2)$ – уверенность в появлении и развитии БА по данным опроса (опросник по бронхолегочным заболеваниям по работам [14])[1];

$Q_{Б}^{П}(3)$ – уверенность в появлении и развитии БА при наличии сопутствующего пневмокониоза;

$Q_{Б}^{П}(4)$ – уверенность в появлении и развитии БА с базовой переменной по отношению ЖЕЛ/ДЖЕЛ (желаемый объем легких/должный обьем легких);

$Q_{Б}^{П}(5)$ и $Q_{Б}^{П}(6)$ – уверенности в прогнозе **БА по уровням длительного психоэмоционального напряжения и** хронического утомления**;**

$Q_{Б}^{П}(7)$ – уверенность в прогнозе БА по величине индекса функциональных изменений;

$Q_{Б}^{П}(8)$ – уверенность в прогнозе БА по величине сатурации крови.

Качество работы прогностической модели (10) было проверено математическим моделированием на выборке по наиболее часто встречаемым значениям используемых предикторов.

В результате моделирования было установлено, что эта модель обеспечивает прогностическую уверенность не хуже 0,85.

Для донозологической диагностики модель (9) трансформируется в модель

$$\begin{aligned} &UF_{П}^{p}(q+1) = \\ &= UF_{П}^{p}(q) + D_{П}^{p}(q+1)[1 - UF_{П}^{p}(q)] \end{aligned}, \quad (11)$$

где $UF_{П}^{p}(1) = D_{П}^{p}(1) = \mu_{П}^{p}(ER_p)$;

$D_{П}^{p}(2) = \mu_{П}^{p}(UF_{П}^{П})$; $D_{П}^{p}(3) = \mu_{П}^{p}(U_{01}^{П})$.

Для диагностической модели (11) функция принадлежности определяются следующим образом: $\mu_{П}^{p}(ER_p)$ – по энергетическим характеристикам БАТ меридиана легкого по рекомендациям [10; 11; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28]; $\mu_{П}^{p}(UF_{П}^{П})$ – по тому же опроснику, что и для прогностической модели; $\mu_{П}^{p}(U_{01}^{П})$ – по данным донозологического опросника пневмокониоза.

Математическое моделирование, проведенное аналогично прогностической задаче, показало, что гибридная модель (11) обеспечивает уверенность не менее 0,9.

[1] Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Введ. 2005-11-01. М.: Изд-во стандартов, 2005. 133 с.

Для уточнения качества работы полученных решающих правил были сформированы репрезентативные контрольные выборки, по которым определялись общепринятые в медицинской практике показатели качества работы моделей принятия решений: диагностическая чувствительность (ДЧ), диагностическая специфичность (ДС), диагностическая эффективность (ДЭ), прогностическая значимость положительных ($ПЗ^+$) и отрицательных ($ПЗ^-$) результатов. Исследования качества полученных решающих правил проводились в соответствии с рекомендациями работы [21]. В результате контрольных испытаний было показано, что для прогностической модели показатели прогностической значимости превышает величину 0,85, а для модели донозологической диагностики показатели диагностической чувствительности, специфичности и эффективности превышают величину 0,95.

Таким образом, результаты статистических испытаний подтвердили результатам математического моделирования.

Это позволяет рекомендовать полученные результаты в медицинскую практику лечебно-профилактических учреждений, обслуживающих работников предприятий, на территории которых расположены гальванические цеха, приводящие к появлению и развитию профессиональных заболеваний.

Выводы

В ходе проведенных исследований получены модели прогнозирования и донозологической диагностики бронхиальной астмы у рабочих гальванических цехов предприятий Курской области. В полученных нечетких моделях учитывались производственные факторы риска совместно с вредными воздействиями эргономики и экологии гальванических цехов и индивидуальным состоянием здоровья работников. В результате статистических испытаний и математического моделирования было установлено, что при прогнозировании уверенность в принимаемом решении превышает величину 0,85, а уверенность в донозологической стадии заболевания – 0,9. Таким образом, полученные модели прогнозирования и донозологической диагностики бронхиальной астмы в условиях трудовой деятельности работников гальванических цехов обеспечивают требуемые для профилактической медицины показатели качества принимаемых решений в условиях недостаточной статистики при плохоформализуемой структуре данных.

Список литературы

1. Применение теории измерения латентных переменных для формирования пространства информативных признаков в задачах оценки функционального состояния человека / А. В. Бойцов, Л. П. Лазурина, С. Н. Кореневская, А. Н. Шуткин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2014. № 6 (57). С. 52–58.

2. Виноградов С. С. Организация гальванического производства. М.: Глобус, 2005. 240 с.

3. Гераськова С. Е., Гаршин В. И. Статистические данные профзаболеваний в гальваническом производстве // Новая наука: опыт, традиции, инновации. 2016. № 3-2 (71). С. 169–174.

4. Использование технологии мягких вычислений для прогнозирования и диагностики профессиональных заболеваний работников агропромышленного комплекса: монография / Н. А. Кореневский, В. И. Серебровский, Р. В. Степашов, Т. Н. Говорухина. Курск: Изд-во Курской государственной сельскохозяйственной академии имени проф. И. И. Иванова, 2016. 224 с.

5. Филь Е. С., Терентьев И. А. Вопросы охраны труда работников гальванических цехов // Молодой ученый. 2016. № 918(1). С. 32–35.

6. Гаршин В. И., Гераськова С. Е., Моргунова Т. В. Прогнозируемая оценка профессионального риска в гальваническом цехе // Приднестровский научный вестник. 2018. Т. 2, № 3. С. 15–20.

7. Кореневский Н. А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2013. № 2. С. 99–103.

8. Кореневский Н. А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем // Медицинская техника. 2015. № 1. С. 33–35.

9. Кореневский Н. А. Проектирование систем принятия решений на нечетких сетевых моделях в задачах медицинской диагностики и прогнозирования // Телекоммуникации. 2006. № 6. С. 25–31.

10. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А., Аль-Касасбех Р. Т. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

11. Кореневский Н. А., Разумова К. В. Синтез коллективов гибридных нечетких моделей оценки состояния сложных систем // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15, № 12. С. 31–39.

12. Кореневский Н. А., Родионова С. Н., Хрипина И. И. Методология синтеза гибридных нечетких решающих правил для медицинских интеллектуальных систем поддержки принятия решений: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 472.

13. Прогнозирование и диагностика заболеваний, вызываемых вредными производственными и экологическими факторами на основе гетерогенных моделей / Н. А. Кореневский, В. И. Серебровский, Н. А. Коптева, Т. Н. Говорухина. Курск: Изд-во Курской государственной сельскохозяйственной академии имени проф. И. И. Иванова, 2012. 231 с.

14. Кореневский Н. А., Шуткин А. Н., Бойцова Е. А. Оценка и управление состоянием здоровья на основе моделей Г. Раша // Медицинская техника. 2015. № 6. С. 37–40.

15. Шуткин А. Н., Кореневская С. Н., Федянин В. В. Проектирование баз знаний медицинских экспертных систем с использованием коллективов нечетких // Информационные проекты в медицине и педагогике: материалы Международной научно-практической конференции. М.: ИП Киселева О. В., 2014. С. 61–64.

16. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data / R. T. Al-Kasabeh, N. A. Korenevskiy, F. Ionescu, A. A. Kuzmin // Proc. 4th IAFA Internnational Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, 2009. P. 71–78.

17. Korenevskiy N. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems // Biomedical engineering. 2008. Vol. 42, N 2. P. 67–72.

18. Кореневский Н. А. Хрипина И. И., Лазурина Л. П. Нечеткие коллективные классификаторы для оценки состояния живых систем // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: сборник материалов XII Международной научно-технической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2015. С. 172–174.

19. Прогнозирование и ранняя диагностика профессиональных заболеваний в электроэнергетике на основе методологии синтеза гибридных нечетких решающих правил: монография / В. И. Серебровский, М. А. Мясоедова, В. В. Серебровский, Н. А. Кореневский, К. В. Разумова. Курск: Изд-во Курской государственной сельскохозяйственной академии имени проф. И. И. Иванова, 2019. 285 с.

20. Метод синтеза нечетких решающих правил на основе моделей системных взаимосвязей для решения задач прогнозирования и диагностики заболеваний / Н. А. Кореневский, М. В. Артеменко, В. Я. Провоторов, Л. А. Новикова // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2014. Т. 13, № 4. С. 881–886.

21. Метод синтеза нечетких моделей принятия решений по оценке состояния и управлению биотехническими системами / Н. А. Кореневский, В. В. Серебровский,

К. В. Разумова, И. И. Хрипина // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 9. С. 68–74.

22. Гадалов В. Н., Кореневский Н. А., Снопков В. Н. Математические модели рефлекторных систем организма человека и их использование для прогнозирования и диагностики заболеваний // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2012. Т. 11, № 2. С. 515–521.

23. Кореневский Н. А., Буняев В. В., Яцун С. М. Компьютерные системы ранней диагностики состояния организма методами рефлексологии / Южно-Российский государственный технический унивеститет (НПИ). Новочеркасск, 2003. 206 с.

24. Модуль регистрации электрических характеристик биологически активных точек для экспертной системы врача рефлексотерапевта / Н. А. Кореневский, Р. А. Крупчатников, И. А. Ключиков, И. И. Хрипина // Известия Юго-Западного университета. 2014. № 5 (56). С. 81–88.

25. Кореневский Н. А., Крупчатников Р. А. Информационно-интелектуальные технологии в рефлексодиагностике и рефлексотерапии: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 528 с.

26. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic / R. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, F. Ionescu, M. Alshamasin, A. Kuzmin // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2012. N 15. P. 681–689.

27. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points / R. Al-Kasasbeh, N. Korenevskiy, F. Ionescu, M. Alshamasin, A. Kuzmin // Acupunct Meridian Stud. 2011. P. 175–182.

28. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making / N. A. Korenevskiy, R. T. Al-Kasasbeh, M. Alshamasin, F. Ionescou, A. Smith // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. 2013. Vol. 16, is. 3. P. 302–313.

References

1. Boitsov A. V., Lazurina L. P., Korenevskaya S. N., Shutkin A. N. Primenenie teorii izmereniya latentnyh peremennyh dlya formirovaniya prostranstva informativnyh priznakov v zadachah ocenki funkcional'nogo sostoyaniya cheloveka [Application of the theory of measurement of latent variables for the formation of the space of informative features in problems of evaluating the functional state of a person]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation,* 2014, no. 6 (57), pp. 52–58.

2. Vinogradov S. S. Organizaciya gal'vanicheskogo proizvodstva [Organization of galvanic production]. Moscow, Globus Publ., 2005. 240 p.

3. Geraskova S. E., Garshin V. I. Statisticheskie dannye profzabolevanij v gal'vanicheskom proizvodstve [Statistical data of occupational diseases in electroplating production]. *Novaya nauka: opyt, traditsii, innovatsii = New science: Experience, Traditions, Innovations*, 2016, no. 3-2 (71), pp. 169–174.

4. Korenevsky N. A., Serebrovsky V. I., Stepashov R. V., Govorukhina T. N. Ispol'zovanie tekhnologii myagkih vychislenij dlya prognozirovaniya i diagnostiki professional'nyh zabolevanij rabotnikov agropromyshlennogo kompleksa [Use of soft computing technology for forecasting and diagnostics of occupational diseases of agricultural workers]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after professor I. I. Ivanov Publ., 2016. 224 p.

5. Fil E. S., Terentyev I. A. Voprosy ohrany truda rabotnikov gal'vanicheskih cekhov [Questions of labor protection of employees of electroplating shops]. *Molodoj uchenyj = Young Scientist*, 2016, no. 918(1), pp. 32–35.

6. Garshin V. I., Geraskova S. E., Morgunova T. V. Prognoziruemaya ocenka professional'nogo riska v gal'vanicheskom cekhe [Predicted professional risk assessment in the electroplating shop]. *Pridnestrovskij nauchnyj vestnik = Pridnestrovian Scientific Bulletin*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 15–20.

7. Korenevsky N. A. Metod sinteza geterogennyh nechetkih pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniem biotekhnicheskih sistem [Method of synthesis of heterogeneous fuzzy rules for analysis and management of the state of biotechnical systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Management, Computer Engineering, Computer Science. Medical Instrumentation,* 2013, no. 2, pp. 99–103.

8. Korenevsky N. A. Ispol'zovanie nechetkoj logiki prinyatiya reshenij dlya medicinskih ekspertnyh system [The use of fuzzy logic decision making for medical expert systems]. *Medicinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 33–35.

9. Korenevsky N. A. Proektirovanie sistem prinyatiya reshenij na nechetkih setevyh modelyah v zadachah medicinskoj diagnostiki i prognozirovaniya [System design decision-making in a fuzzy network models in problems of medical diagnostics and forecasting]. *Telekommunikacii = Telecommunications,* 2006, no. 6, pp. 25-31.

10. Korenevsky N. A., Krupchatnikov R. A., Al-Kasasbeh R. T. Teoreticheskie osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v medicine, psihologii i ekologii na osnove nechetkih setevyh modelej [Theoretical foundations of acupuncture Biophysics with applications in medicine, psychology and ecology based on fuzzy network models]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p.

11. Korenevsky N. A., Razumova K. V. Sintez kollektivov gibridnyh nechetkih modelej ocenki sostoyaniya slozhnyh system [Synthesis of collectives of hybrid fuzzy models for assessing the state of complex systems]. *Naukoemkie tekhnologii = High Technology*, 2014, vol. 15, no. 12, pp. 31–39.

12. Korenevsky N. A., Rodionova S. N., Khripina I. I. Metodologiya sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil dlya medicinskih intellektual'nyh sistem podderzhki prinyatiya reshenij [Methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules for medical intelligent decision support systems]. Stary Oskol, TNT Publ., 2019. 472 p.

13. Korenevsky N. A., Serebrovsky V. I., Kopteva N. A., Govorukhina T. N. Prognozirovanie i diagnostika zabolevanij, vyzyvaemyh vrednymi proizvodstvennymi i ekologicheskimi faktorami na osnove geterogennyh modelej [Forecasting and diagnostics of diseases caused by harmful industrial and environmental factors based on heterogeneous models]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after professor I. I. Ivanov Publ., 2012, 231 p.

14. Korenevsky N. A., Shutkin A. N., Boitsova E. A. Ocenka i upravlenie sostoyaniem zdorov'ya na osnove modelej G. Rasha [Assessment and management of health status based on G. Rush models]. *Medicinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2015, no. 6, pp. 37–40.

15. Shutkin A. N., Korenevskaya S. N., Fedyanin V. V. [Designing knowledge bases of medical expert systems using fuzzy rules collectives]. Informacionnye proekty v medicine i pedagogike. Sbornik materialov XII Mezhduna-rodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Information projects in medicine and pedagogy. Materials of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, IP Kiseleva O. V. Publ., 2014, pp. 61–64. (In Russ.).

16. Al-Kasabeh R. T., Korenevskiy N., Ionescu F., Kuzmin A. Synthesis of combined fuzzy decision rules based on the exploration analysis data. Proc. 4th IAFA Internnational Conference Interdisciplinary Approaches in Fractal Analysis. Bucharest, 2009, pp. 71–78.

17. Korenevskiy N. A., Krupchatnikov R. A., Gorbatenko S. A. Generation of fuzzy network models taught on basic of data structure for medical expert systems. *Biomedical engineering*, 2008, vol. 42, no. 2, pp. 67–72.

18. Korenevsky N. A., Khripina I. I., Lazurina L. P. [Collective fuzzy classifiers to assess the status of living systems]. Optiko-elektronnye pribory i ustrojstva v sistemah raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazhenij i simvol'noj informacii. Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii [Optical-electronic instruments and devices in systems of pattern recognition, image processing, and character information. Collection of materials of the XII International scientific and technical conference]. Kursk, Southwest State University Publ., 2015, pp. 172–174. (In Russ.)

19. Serebrovsky V. V., Myasoedova M. A., Serebrovsky V. V., Korenevsky N. A., Razumova K. V. Prognozirovanie i rannyaya diagnostika professional'nyh zabolevanij v elektroenergetike na osnove metodologii sinteza gibridnyh nechetkih reshayushchih pravil [Forecasting and early diagnostics of occupational diseases in the electric power industry based on the methodology of synthesis of hybrid fuzzy decision rules]. Kursk, Kursk State Agricultural Academy named after professor University Publ., 2019. 285 p.

20. Korenevsky N. A., Artemenko M. V., Provotorov V. Ya., Novikova L. A. Metod sinteza nechetkih reshayushchih pravil na osnove modelej sistemnyh vzaimosvyazej dlya resheniya zadach prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij [Method of synthesis of fuzzy decision rules based on models of system relationships for solving problems of forecasting and diagnostics of diseases]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems,* 2014, no. 4, pp. 881–886.

21. Korenevsky N. A., Serebrovsky V. V., Razumova K. V., Khripina I. I. Metod sinteza nechetkih modelej prinyatiya reshenij po ocenke sostoyaniya i upravleniyu biotekhnicheskimi sistemami [Method of synthesis of fuzzy decision-making models for assessing the state and management of biotechnical systems]. *Biomedicinskaya radioelektronika = Biomedical Radioelectronics,* 2016, no. 9, pp. 68–74.

22. Gadalov V. N., Korenevsky N. A., Snopkov V. N. Matematicheskie modeli reflektornyh sistem organizma cheloveka i ih ispol'zovanie dlya prognozirovaniya i diagnostiki zabolevanij [Mathematical models of reflex systems of the human body and their use for predicting and diagnosing diseases]. *Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah = System Analysis and Management in Biomedical Systems*, 2012, vol. 11, no. 2, pp. 515–521.

23. Korenevsky N. A., Bunyaev V. V., Yatsun S. M. Komp'yuternye sistemy rannej diagnostiki sostoyaniya organizma metodami refleksologii [Computer systems for early diagnostics of the state of the body by reflexology methods]. Novocherkassk, South-Russian State Technical University Publ., 2003. 206 p.

24. Korenevsky N. A., Krupchatnikov R. A., Klyuchikov I. A., Khripina I. I. Modul' registracii elektricheskih harakteristik biologicheski aktivnyh tochek dlya ekspertnoj sistemy vracha refleksoterapevta [Module for registration of electrical characteristics of biologically active points for the expert system of a reflexologist]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University,* 2014, no. 5 (56), pp. 81–88.

25. Korenevsky N. A. Krupchatnikov R. A. Infomacionno-intelektual'nye tekhnologii v refleksodiagnostike i refleksoterapii [Information - intellectual technologies in reflexology and reflexology]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013. 528 p.

26. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy N., Ionescu F., Alshamasin M., Kuzmin A. Prediction and prenosological diagnostics of heart diseases based on energy characteristics of acupuncture points and fuzzy logic. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2012, no. 15, pp. 681–689.

27. Al-Kasasbeh R., Korenevskiy N., Ionescu F., Alshamasin M., Kuzmin A. Synthesis of fuzzy logic for prediction and medical diagnostics by energy characteristics of acupuncture points. *Acupunct Meridian Stud*, 2011, pp. 175–182.

28. Korenevskiy N. A., Al-Kasasbeh R. T., Alshamasin M., Ionescou F., Smith A. Prediction of gastric ulcers based on the change in electrical resistance of acupuncture points using fuzzy logic decision-making. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2013, vol. 16, is. 3, pp. 302–313.

Информация об авторах / Information about the Authors

Родионова Софья Николаевна, преподаватель кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Sofia N. Rodionova, Lecturer of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Аксёнов Виталий Вячеславович, зав. лабораториями кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Vitaly V. Aksenov, Head of Laboratories of the Department of Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Медников Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Dmitry A. Mednikov, Post-Graduate Student of the Biomedical Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kstu-bmi@yandex.ru

Сафронов Руслан Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики, Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: russafronov@yandex.ru

Ruslan I. Safronov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electric Power Engineering, Kursk State Agricultural Academy named after I. I. Ivanov, Kursk, Russian Federation, e-mail: russafronov@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 004.31(075.8)

Моделирование беспроводной передачи данных для перемещаемых объектов приема-передачи

Д. Б. Борзов[1], М. А. Кошелев[1] ✉

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

✉ e-mail: maks46.krutoe@gmail.com

Резюме

Цель исследований *заключается в уменьшении временных затрат на обработку информарции, способствующую повышению быстродействия реконфигурируемой системы реального времени, путём создания методики и алгоритма распределения массива вычислительных задач.*

Методы *исследования работы основаны на определениях теории множеств, графов, теории вероятности и математической статистики. С их помощью были созданы математическая модель и система критериев реконфигурируемой вычислительной системы реального времени, построенной на беспроводном протоколе, позволяющие выполнять размещение задач по минимально-максимальной оценке времени, а также предложен алгоритм размещения задач в вычислительном комплексе, позволяющий увеличить производительность системы за счёт сокращения времени передачи данных.*

Результаты. *В результате исследований была разработана методика распределения вычислительных задач в реконфигурируемой вычислительной системе реального времени, позволяющая сократить время передачи данных внутри системы, что повышает производительность комплекса. Составлена методика распределения вычислительных задач на отдельные процессорные модули, промоделирована работа предложенных методик, предложена система критериев, описывающая конечное состояние реконфигурируемой вычислительной системы реального времени. В результате полученная система дала выигрыш по времени примерно в 2,5 раза. Размещение в динамических системах связных задач снижает коэффициент выигрыша линейно.*

Заключение. *Полученная модель может найти применение в распределённых вычислениях. Промоделирована работа предложенных методик. Их анализ подтвердил увеличение производительности системы в целом. Были выбраны параметры для разработанной системы, дающие выигрыш по времени примерно в 2,5 раза.*

Ключевые слова: *алгоритм; матрица расстояний; коэффициент расстояния; матрица связей; матрица объёмов заданий; мастер; процессорный модуль; беспроводной протокол; многопроцессорная система; реконфигурируемая вычислительная система; алгоритм; матрица расстояний; коэффициент расстояния; матрица связей; матрица объёмов заданий; мастер; процессорный модуль; беспроводной протокол; многопроцессорная система; реконфигурируемая вычислительная система.*

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

© Борзов Д. Б., Кошелев М. А., 2021

Для цитирования: Борзов Д. Б., Кошелев М. А. Моделирование беспроводной передачи данных для перемещаемых объектов приема-передачи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 1. С. 144–156.

Поступила в редакцию 18.01.2021 *Подписана в печать 16.02.2020* *Опубликована 30.03.2021*

Simulation of Wireless Data Transmission with the Ability to Move the Receiving-Transmitting Object

Dmitry B. Borzov[1], Maksim A. Koshelev[2] ✉

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

✉ e-mail: maks46.krutoe@gmail.com

Abstract

The purpose of the research *is to reduce the time spent on processing information, contributing to an increase in the speed of a reconfigurable real-time system, by creating a methodology and an algorithm for distributing an array of computational tasks.*
The research ***methods*** *of the work are based on the definitions of set theory, graphs, probability theory and mathematical statistics. With their help, a mathematical model and a system of criteria for a reconfigurable real-time computing system, built on a wireless protocol, was created, which allows placing tasks according to the minimum-maximum time estimate. And also an algorithm for placing tasks in a computer complex is proposed, which allows increasing the performance of the system by reducing the time of data transfer.*
Results. *As a result of the research, a method was developed for the distribution of computational tasks in a real-time reconfigurable computing system, which allows to reduce the time of data transmission within the system, which increases the performance of the complex. A methodology for distributing computational tasks to individual processor modules has been compiled. The work of the proposed methods is simulated. And a system of criteria is proposed that describes the final state of a reconfigurable real-time computing system. As a result, the resulting system gave a gain in time of about 2.5 times. Placing connected problems in dynamic systems reduces the payoff coefficient linearly.*
Conclusion. *The resulting model can be used in distributed computing. The work of the proposed methods is simulated. Their analysis confirmed the increase in system performance as a whole. The parameters for the developed system were chosen, giving a gain in time of about 2.5 times.*

Keywords: *algorithm; distance matrix; distance coefficient; matrix of links; matrix of job volumes; master; processor module; wireless protocol; multiprocessor system; reconfigurable computing system.*

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

For citation: Borzov D. B., Koshelev M. A. Simulation of Wireless Data Transmission with the Ability to Move the Receiving-Transmitting Object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2021; 11(1): 144–156. (In Russ.)

Received 18.01.2021 *Accepted 16.02.2020* *Published 30.03.2021*

Введение

IT-сфера за последние 10 лет сделала скачок вперёд. Она развивается, затрагивая все больше областей науки и техники. И одной из востребованных тем этого направления является создание системы, способной адаптироваться под разные типы решаемых задач. Это один из перспективных методов повышения реальной производительности всего вычислительного комплекса.

Такие ученые, как И. А. Коляев, И. И. Левин, В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин, Э. А. Трахтенгерц, В. М. Курейчик и другие, занимались обозначенной темой. В своих работах они показали эффективность вышеназванного метода повышения производительности на примере распределения задач на отдельные процессорные модули. Но топология описанных систем, как правило, статична, а это снижает востребованность системы и делает ее узкоспециализированной [1; 2; 3].

Системы, построенные на беспроводных протоколах, рассматривались как перспективные для построения реконфигурируемых систем [4]. В этом направлении рассмотрены сенсорные сети – множество информационных датчиков и устройств, объединенных между собой радиоканалом.

С развитием беспроводных протоколов реконфигурируемые вычислительные системы, состоящие из множества процессорных модулей, продолжили своё развитие. Они могут самостоятельно обрабатывать данные, уменьшая время выполнения общей задачи и тем самым увеличивая производительность комплекса в целом. За счет регулярной смены как процессорных модулей, так и их расположения уменьшается вероятность утечки данных. Хост-устройство также меняется, вследствие чего сложнее производить кибератаки [5; 6; 7]. Выход из строя любого из процессорных модулей никак не повлияет на работу всей системы, так как назначенная ему задача все равно будет выполнена после распределения ее исправному [8].

Исходя из вышесказанного беспроводные протоколы дают возможность построить реконфигурируемую информационно-защищенную отказоустойчивую систему, элементы которой могут быть разнесены по большой площади. Такие системы используются во многих сферах деятельности от промышленности до военного комплекса [9; 10; 11]. В связи с этим моделирование беспроводной передачи данных с возможностью перемещения объекта приема-переда является актуальной задачей.

Для решение данной задачи были разработаны методика и алгоритм распределения вычислительных задач на процессорные модули реконфигурируемой вычислительной системы реального времени и способ ее построения, а также реализовано моделирование предложенных методик и алгоритмов и осуществен анализ результатов с целью выявления

уменьшения временных затрат. В результате чего было зафиксировано уменьшение временных затрат более чем в 2 раза.

Материалы и методы

Для построения реконфигурируемой вычислительной системы реального времени нужно провести ряд действий, направленных на составление матрицы расстояний ANxN и выбор мастера [12; 13]. Матрица расстояний содержит информацию о расстоянии между процессорными модулями, а мастер отвечает за запрос и размещение задач процессорным модулям, входящим в систему на текущий момент времени.

Мастер выбирается из условий:

1) $r = \min\{\sum N \ \ rij\}$, где N – количество процессорных модулей; rij – значения матрицы расстояний;

2) rn = count(rmax), где rmax – максимум по строке. При выполнении условия rм < rn;

3) Gм > GПМ , где Gм – коэффициент усиления антенны мастера; GПМ – коэффициент усиления антенны процессорного модуля, претендующего на роль мастера.

Условие 1 является необходимым и достаточным, 2 и 3 условия используются как дополнительные, когда первое условие не выявило мастера.

По указанным условиям составлен алгоритм выбора мастера из множества устройств, представленный ниже (рис. 1).

Алгоритм, представленный на рисунке 1, состоит из нескольких шагов:

1. По каждой строке матрицы расстояний считается сумма. Высчитывается максимум во всей матрицы расстояний.

2. Из полученных сумм выбирается минимальная. Если минимальных сумм несколько, т. е. несколько претендентов на роль мастера, тогда проверяется следующее условие.

3. Из тех устройств, у кого сумма по строке в матрице расстояний минимальна, считается количество максимумов, которые найден на первом шаге. Сравнивается этот показатель. У кого максимумов меньше, тот становится мастером. Если же и это не выявило мастера, выполняется 4 шага.

4. Для тех устройств, у которых минимум максимумов в строке, сравнивается коэффициент усиления антенны. Устройство с самым большим коэффициентом становится мастером.

Для составления матрицы расстояний необходимо знать уровень сигнала. Этот показатель наравне с физическим расстоянием влияет на скорость передачи данных, а вычисляется он при подключении устройства к точке доступа [14]. В свою очередь расчет расстояния между устройствами – процесс трудоемкий и дает неточный результат (десятки метров). Поэтому в матрице расстояний будет записываться коэффициент расстояния, как было написано выше, а не физическое расстояние [15].

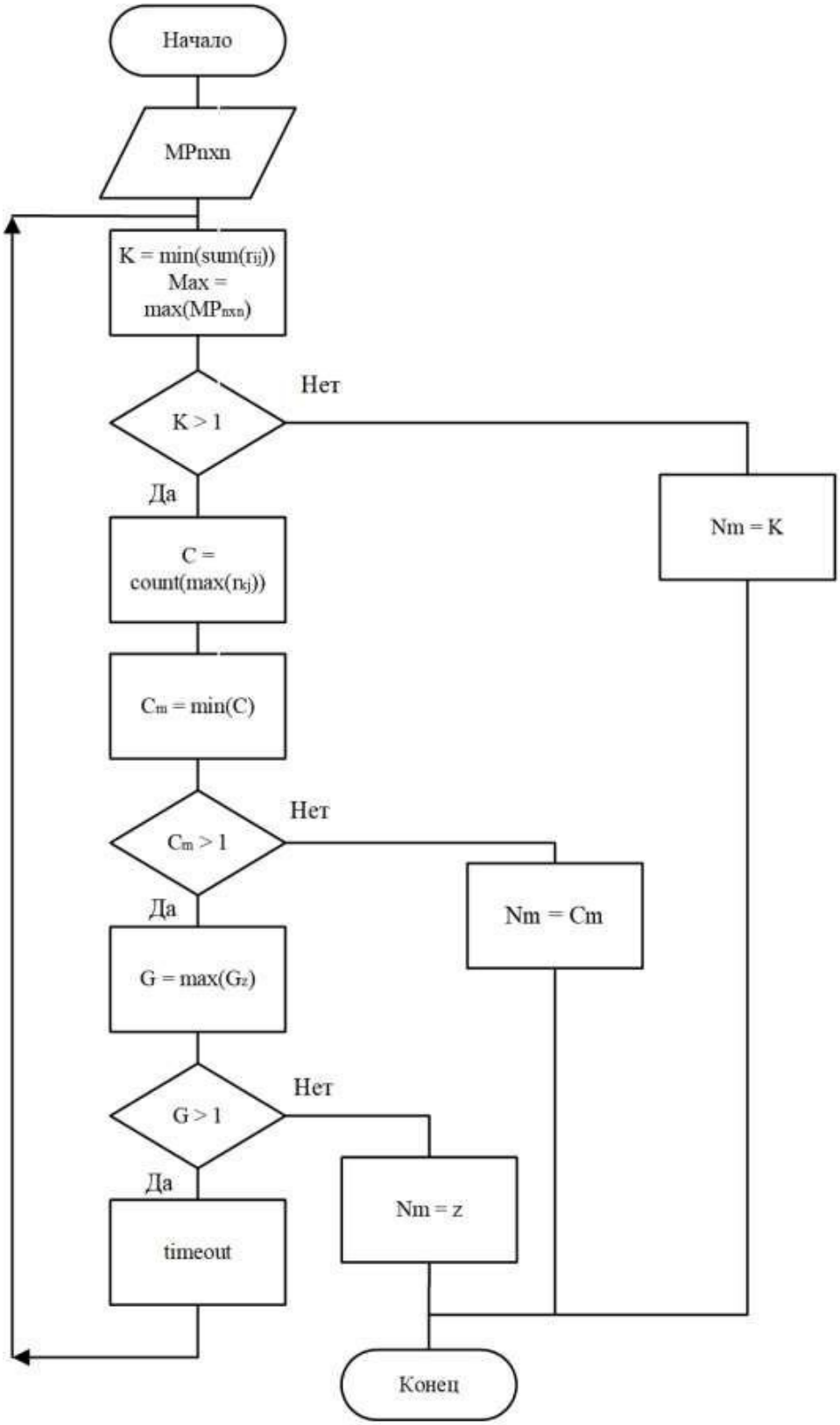


Рис. 1. Алгоритм выбора мастера

Fig. 1. Master selection algorithm

Таким образом, методика построения реконфигурируемой вычислительной системы реального времени состоит из следующих шагов:

1. За время ожидания в системе фиксируется количество активных устройств.

2. Составляется матрица расстояний из коэффициентов расстояния.

3. Выбирается мастер.

Следует отметить, что процессорные модули работают в режиме точки доступа. Каждый процессорный модуль при активном Wi-Fi начинает строить реконфигурируемую вычислительную систему реального времени.

На первом шаге каждому устройству, подключающемуся к системе, присваивается идентификатор, уникальный в приделах настоящей системы [16].

На протяжении времени ожидания процессорные модули обмениваются служебными пакетами, содержащими идентификаторы процессорных модулей, коэффициент усиления антенны и массив информации [17].

Параллельно расчетам процессорные модули продолжают обмениваться служебными пакетами обмена, обновляются данные матрицы расстояний и сравниваются с действующей [18]. Если при изменениях меняется мастер, действующий мастер завершает начатые операции, отправляет задания источнику, если успел их запросить, и продолжает действовать как рядовой процессорный модуль, в то время как новый мастер уже выполняет свои функции.

По методике, описанной выше, составлен алгоритм построения реконфигурируемой вычислительной системы реального времени. Он выполняется в двух связанных между собой потоках. Благодаря этому отслеживаются все изменения, и реакция на них происходит в реальном времени.

Результаты и их обсуждение

Для анализа работы алгоритма размещения в реконфигурируемой вычислительной системе реального времени было выполнено моделирование на следующих данных:

1. Рассмотрена зависимость выигрыша от количества процессорных модулей.

2. Рассмотрена зависимость выигрыша от максимального объёма передаваемых данных.

Выигрыш η_w – минимально-максимальный критерий, указывающий, во сколько раз новое размещение выгоднее изначального.

Для получения результатов по пункту 1 были введены настройки, как на рисунке 2.

Значение «Максимальное количество» менялось в пределах от 25 до 250. По этим данным получены результаты, представление на рисунке 3.

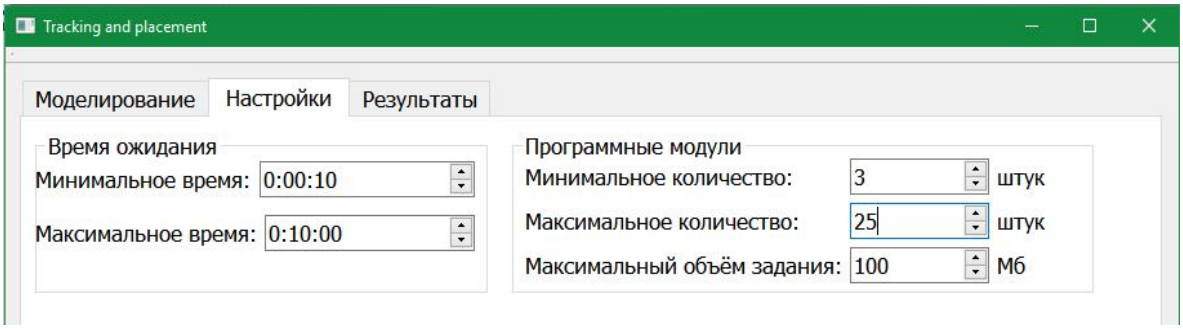


Рис. 2. Настройки для результатов зависимости выигрыша от количества процессорных модулей

Fig. 2. Settings for the results of dependence of gain on the number of processor modules

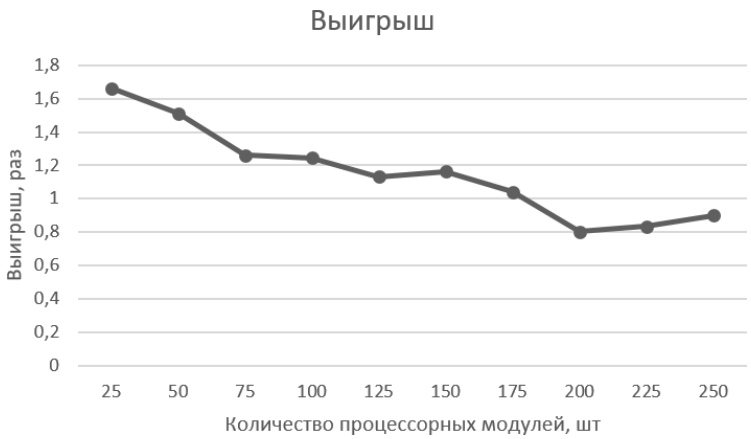


Рис. 3. Зависимость выигрыша от количества процессорных модулей

Fig. 3. Dependence of the gain on the number of processor modules

На графике, представленном на рисунке 3, по оси абсцисс отложено количество процессоров измеряемое в штуках, по оси ординат – выигрыш, измеряемый в разах.

По графику видно, что с увеличением количества процессоров выигрыш линейно уменьшается, но не опускается до нуля. Это видно на графике, представленном на рисунке 4, где показаны три линии – максимальный, средний и минимальный выигрыш.

Можно заметить, что все три показателя стремятся к единице, т. е. дальнейшее увеличение количества процессорных модулей не уменьшит выигрыш до нулевого значения.

Для получения результатов по пункту 2 были введены те же настройки, как на рисунке 2. Но на этот раз изменялось не только значение «Максимальное количество», но и значение «Максимальный объём задания» [19]. Количество ПМ изменялось от 25 до 250, а объём каждый раз увеличивался в 10 раз, пока не достиг значения в 100000000 Мб. Полученные данные представлены в таблице 1.

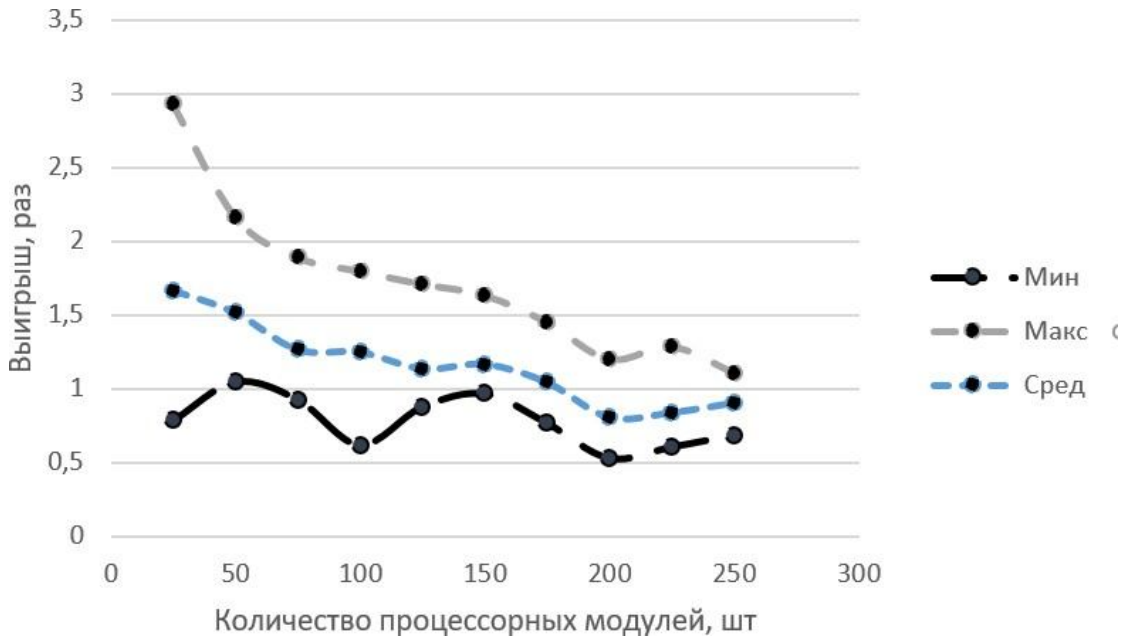


Рис. 4. Сравнительный график

Fig. 4. Comparative chart

Таблица. Зависимость выигрыша от объёма передаваемых данных

Table. Dependence of the gain on the volume of transmitted data

	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
100	0.894	0.979	1.436	1.005	1.221	1.051	0.79777	0.88198	1.25331	0.729
1000	2.284	1.705	1.413	1.457	1.620	1.876	1.94515	1.21942	1.46048	1.565
10000	1.183	1.803	2.768	2.093	2.040	2.018	2.36914	1.85957	1.44741	2.018
100000	0.686	1.468	1.936	2.408	1.958	1.812	1.65331	1.98876	1.68993	1.765
1000000	2.513	1.687	2.293	2.751	2.130	1.465	1.79025	1.51268	1.80964	1.437
10000000	1.289	1.530	2.552	1.405	1.543	1.981	1.5464	1.53473	1.5335	1.598
100000000	2.581	1.671	1.936	1.538	1.837	1.693	1.52022	1.59578	1.55986	1.785

В данной таблице первый столбик – объём задач, указанный в мегабитах, первая строчка – количество процессорных модулей, выраженных в штуках. На пересечении – значения выигрыша. Красным отмечена область, где коэффициент меньше значения 1,7. Выше этого значения отмечено зелёным. По таблице значений можно заметить, что наиболее выгодными являются такие показатели, как количество процессорных модулей от 50 до 150 и объём заданий от 10000 до 1000000 Мб. Это объясняется особенностями беспроводного соединения [20]. При данных показателях устройства смогут работать без сбоев и зависаний, что подтверждается практикой.

По графику можно заметить общую закономерность: с увеличением количества связанных задач выигрыш уменьшается. Это говорит о том, что распределять в динамической системе эффективнее несвязанные задачи.

Выводы

1. С увеличением количества процессорных модулей коэффициент, показывающий, во сколько раз уменьшилось время передачи данных после размещения, уменьшается линейно, но не достигает нулевого значения. Скорость выполнения разработанного алгоритма примерно в 100 раз выше алгоритмов размещения, основанных на методе ветвей и границ.

2. С увеличение объёма передаваемых данных выигрыш растёт до значения 2, а затем колеблется в пределах 2±0,5. Наибольший выигрыш (2,5-3 раза) достигается при показателях: объём данных задач равен 10000 Мб, и количество процессорных модулей равно 75–100.

3. С увеличением количества связанных пар задач линейно уменьшается выигрыш.

В дальнейшем планируется протестировать скорость выполнения алгоритма и выявить зависимость выиграша по времени, выраженного в тактах, относительно количества процессорных модулей, а также зависимость выигрыша от количества связанных задач.

Список литературы

1. Андреев А. М., Можаров Г. П., Сюзев В. В. Многопроцессорные вычислительные системы: теоретический анализ, математические модели и применение: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 332 с.

2. Бедакова Н. В. Анализ методов размещения складской сети пространственно-распределенного предприятия // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2016. № 6. С. 123–135.

3. Богданов А. В., Корхов В. В., Мареев В. В. Архитектуры и топологии многопроцессорных вычислительных систем. 2-е изд. М.: Интуит, 2016. 135 с.

4. Борзов Д. Б. Аппаратные средства планирования размещения задач в мультипроцессорных системах критического: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. 179 с.

5. Борзов Д. Б., Титов В. С. Вопросы проектирования и динамической реконфигурации топологии систем логического управления в системах высокой готовности: монография / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2015. 282 с.

6. Борзов Д. Б., Титов В. С. Параллельные вычислительные системы (архитектура, принципы размещения задач: монография / Курский государственный технический университет. Курск, 2009. 159 с.

7. Власов Д. В. Современные проблемы информатики: философский анализ // Статистика и экономика. 2011. № 2. С. 233–239.

8. Гришанков В. Технология ANT – что это такое в телефоне? URL: https:// androidlime.ru/ant-technology-what-is-it-on-the-phone (дата обращения: 10.12.2020).

9. Дацюк В. Н., Букатов А. А., Виноградова С. А. Руководство по программированию высокопроизводительных вычислительных систем. Ростов н/Д, 2017. 208 с.

10. Жогов Н. Insteon: «умный» дом своими руками. URL: http:// www.ferra.ru/ review/smarthome/SmartHome-Insteon.htm#Протокол_связи (дата обращения: 01.12.2020).

11. Закалюжный А. А. Развитие беспроводных сетей как средство контроля и управления удаленными системами // Молодой исследователь Дона. 2018. № 4(13). С. 46–51.

12. Зинкин С. А., Белецкий П. А. Оптимизация размещения данных по узлам информационно-вычислительной // Современные тенденции технических наук: материалы II Международной научной конференции. Уфа: Лето, 2013. С. 29–31.

13. Князева М. В. Метод ветвей и границ для решения задачи сетевого планирования с ограниченными ресурсами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 7. С. 78–84.

14. Липницкий В. А, Сергей А. И., Спичекова Н. В. Научно-технические задачи, связанные с бинарными матрицами // Цифровая обработка сигналов и теория кодирования: материалы научно-технического семинара / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Минск, 2018. С. 43–47.

15. Макаренко А. В. Применение методов теории графов к исследованию Т-синхронизации хаотических систем // Проблемы управления. 2016. № 3. С. 2–15.

16. Новиков Е. А., Ващенко Г. В. Последовательный и параллельный алгоритмы переменного шага на основе (2,2)-метода // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 5. С. 48.

17. Семахин А. М., Баталов И. С. Динамическое программирование в решении задачи оптимального размещения электронных компонентов системы управления // Молодой ученый. 2013. № 6. С. 144–146.

18. Чистобаев А. И., Семенова З. А. Статистический метод в медико-географических исследованиях // Географический вестник. 2013. № 1 (24). С. 18–25.

19. Шейкин М. Сетевые технологии ZigBee. Обзор элементной базы // Телекоммуникации и связь. 2011. № 6. С. 36–40.

20. Yanovskii A. A., Simonovskii A. Ya., Klimenko E. M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014. Vol. 50, N 3, P. 260–266.

References

1. Andreev A. M., Mozharov G. P., Syuzev V. V. Mnogoprotsessornye vychisli-tel'nye sistemy: teoreticheskii analiz, matematicheskie modeli i primenenie [Multiprocessor computing systems: theoretical analysis, mathematical models and application]. Moscow, Publishing House of MSTU im. N. E. Bauman, 2011. 332 p.

2. Bedakova N. V. Analiz metodov razmeshcheniya skladskoi seti prostranstvenno-raspredelennogo predpriyatiya [Analysis of methods of placing a warehouse network of a spatially distributed enterprise]. *Nauchnye trudy Kubanskaogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Scientific Works of the Kuban State Technological University*, 2016, no. 6, pp. 123–135.

3. Bogdanov A. V., Korkhov V., Mareev V., Stankova E. N. Arkhitektury i topologii mnogo-protsessornykh vychislitel'nykh sistem [Architecture and topology of multiprocessor computing systems]. 2th ed. Moscow, Intuit Publ., 2016. 135 p.

4. Borzov D. B. Apparatnye sredstva planirovaniya razmeshcheniya zadach v mul'-tiprotsessornykh sistemakh kriticheskogo [Hardware planning of tasks placement in multiprocessor systems for critical purposes]. Kursk, Southwest State University Publ., 2018. 179 p.

5. Borzov D. B., Titov V. S. Voprosy proektirovaniya i dinamicheskoi rekonfi-guratsii topologii sistem logicheskogo upravleniya v sistemakh vysokoi gotovnost [Issues of design and dynamic reconfiguration of the topology of logical control systems in high availability systems]. Kursk, Southwest State University Publ., 2015. 282 p.

6. Borzov D. B., Titov V. S. Parallel'nye vychislitel'nye sistemy (arkhitektura, printsipy razmeshcheniya zadach [Parallel computing systems (architecture, principles of task placement]. Kursk, Kursk State Technical University Publ., 2009. 159 p.

7. Vlasov D. V. Sovremennye problemy informatiki: filosofskii analiz [Modern problems of informatics: philosophical analysis]. *Statistika i ekonomika = Statistics and Economics*, 2011, no. 2, pp. 233–239.

8. Grishankov V. Tekhnologiya ANT – chto eto takoe v telefone? [ANT technology – what is it in the phone?]. Available at: https://androidlime.ru/ant-technology-what-is-it-on-the-phone. (accessed 10.12.2020).

9. Datsyuk V. N. Rukovodstvo po programmiro-vaniyu vysokoproizvoditel'nykh vy-chislitel'nykh sistem [Guidelines for programming high-performance computing systems]. Rostov-on-Don, 2017. 208 p.

10. Zhogov N. Insteon: "umnyi" dom svoimi rukami [Insteon: do-it-yourself "smart" house]. Available at: http://www.ferra.ru/review/smarthome/SmartHome-Insteon.htm# Communication_protocol. (accessed 01.12.2020)

11. Zakalyuzhny A. A. Razvitie besprovodnykh setei kak sredstvo kontrolya i upravleniya udalennymi sistemami [Development of wireless networks as a means of monitoring and managing remote systems]. *Molodoi issledovatel' Dona = Young Researcher of Don*, 2018, no. 4 (13), pp. 46–51.

12. Zinkin S. A., Beletskiy P. A. Optimizatsiya razmeshcheniya dannykh po uzlam informatsionno-vychislitel'noi [Optimization of data placement on the nodes of the information–computing network]. Sovremennye tendentsii tekhnicheskikh nauk. Materialy II Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii [Modern trends in technical sciences. Materials of the II Intern. scientific. conf.]. Ufa, Leto Publ., 2013, pp. 29–31.

13. Knyazeva M. V. Metod vetvei i granits dlya resheniya zadachi setevogo planiro-vaniya s ogranichennymi resursami [Method of branches and boundaries for solving the problem of network planning with limited resources]. *Izvestiya Yuzhnogo Federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the Southern Federal University. Technical Science*, 2010, no. 7 (108), pp. 78–84.

14. Lipnitsky V. A., Sergey A. I., Spichekova N. V. [Scientific and technical problems associated with binary matrices]. Tsifrovaya obrabotka signalov i teoriya kodirovaniya. Materialy nauchno-tekhnicheskogo seminara. Belorusskii gosudarstvennyi universitet informatiki i radioelektroniki [Digital signal processing and coding theory. Materials of scientific technical seminar]. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Publ., 2018, pp. 43–47. (In Russ.)

15. Makarenko A. V. Primenenie metodov teorii grafov k issledovaniyu T-sinkhronizatsii khaoticheskikh sistem [Application of methods of graph theory to the study of T–synchronization of chaotic systems]. *Problemy upravleniya = Control Problems*, 2016, no. 3, pp. 2–15.

16. Novikov E. A., Vashchenko G. V. Posledovatel'nyi i parallel'nyi algoritmy peremennogo shaga na osnove (2,2)-metoda [Sequential and parallel algorithms of variable step based on the (2,2)-method]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*, 2011, no. 5, p. 48.

17. Semakhin A. M., Batalov I. S. Dinamicheskoe programmirovanie v reshenii zadachi optimal'nogo razmeshcheniya elektronnykh komponentov sistemy upravleniya [Dynamic programming in solving the problem of optimal placement of electronic components of the control system]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2013, no. 6, pp. 144–146.

18. Chistobaev A. I., Semenova Z. A. Statisticheskii metod v mediko-geograficheskikh issledovaniyakh [Statistical method in medico-geographical research]. *Geograficheskii vestnik = Geographic Bulletin*, 2013, no. 1 (24), pp. 18–25.

19. Sheikin M. Setevye tekhnologii ZigBee. Obzor elementnoi bazy [ZigBee network technologies. Review of the element base]. *Telekommunikatsii i svyaz'= Telecommunications and Communications*, 2011, no. 6, pp. 36–40.

20. Yanovskii A. A., Simonovskii A. Ya., Klimenko E. M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 260–266.

Информация об авторах / Information about the Authors

Борзов Дмитрий Борисович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: borzovdb@kursknet.ru

Dmitry B. Borzov, Dr. of Sci. (Engineering), Full Professor, Professor of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: borzovdb@kursknet.ru

Кошелев Максим Александрович, аспирант кафедры вычислительной техники, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: maks46.krutoe@gmail.com

Maxim A. Koshelev, Post-Graduate Student of the Department of Computer Engineering, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: maks46.krutoe@gmail.com

К сведению авторов

1. К публикации в журнале «Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение» принимаются актуальные материалы, содержащие новые результаты научных и практических исследований, соответствующие профилю журнала, не опубликованные ранее и не переданные в редакции других журналов.

2 Авторы статей должны представить в редакцию журнала:

- статью, оформленную в соответствии с правилами оформления статей, представляемых для публикации в журнале;
- разрешение на опубликование в открытой печати статьи от учреждения, в котором выполнена работа.
- сведения об авторах (фамилия, имя отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, почтовый адрес, телефон, e-mail);
- лицензионный договор.

3. Бумажный вариант статьи подписывается всеми авторами.

4. Редакция не принимает к рассмотрению рукописи, оформленные не по правилам.

5. **Публикация бесплатная.**

6. Основной текст рукописи статьи (кроме аннотации и ключевых слов) набирают в текстовом редакторе MS WORD шрифтом «Times New Roman» размером 14 пт с одинарным интервалом, выравнивание по ширине. Поля с левой стороны листа, сверху и снизу – 2,5 см, с правой стороны-2 см. Абзацный отступ – 1,5 см.

7. Схема построения публикации: УДК (индекс по универсальной десятичной классификации), фамилия и инициалы автора(ов) с указанием ученой степени, звания, места работы (полностью), электронного адреса (телефона), название (строчные), аннотация и ключевые слова, текст с рисунками и таблицами, список литературы. Авторы, название, аннотация и ключевые слова, список литературы приводятся на русском и английском языках.

Перед основным текстом печатается аннотация (200-250 слов), отражающая краткое содержание статьи.

8. При формировании текста не допускается применение стилей, а также внесение изменения в шаблон или создание собственного шаблона. Слова внутри абзаца следует разделять одним пробелом; набирать текст без принудительных переносов; не допускаются разрядки слов.

9. Для набора формул и переменных следует использовать редактор формул MathType версии 5.2 и выше с размерами: обычный – 12 пт; крупный индекс 7 пт, мелкий индекс – 5 пт; крупный символ – 18 пт; мелкий символ – 12 пт.

Необходимо учитывать, что **полоса набора – 75 мм**. Если формула имеет больший размер, ее необходимо упростить или разбить на несколько строк. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**

Все русские и греческие буквы (Ω, η, β, μ, ω, υ и др.) в формулах должны быть набраны прямым шрифтом. Обозначения тригонометрических функций (sin, cos, tg и т.д.) – прямым шрифтом. Латинские буквы – прямым шрифтом.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Рисунки и таблицы располагаются по тексту. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Иллюстрации, встраиваемые в текст, должны быть выполнены в одном из стандартных форматов (TIFF, JPEG, PNG) с разрешением не ниже 300 *dpi* и публикуются в черно-белом (градации серого) варианте. Качество рисунков должно обеспечивать возможность их полиграфического воспроизведения без дополнительной обработки. **Рисунки, выполненные в MS Word, недопустимы**.

Рисунки встраиваются в текст через опцию «Вставка-Рисунок-Из файла» с обтеканием «В тексте» с выравниванием по центру страницы без абзацного отступа. Иные технологии вставки и обтекания **не допускаются.**

12. **Список литературы к статье обязателен** и должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы (не менее 10). Пристатейные библиографические списки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках.

13. В материале для публикации следует использовать только общепринятые сокращения.

Все материалы направлять по адресу: 305040, г.Курск, ул. 50 лет Октября, 94. ЮЗГУ, редакционно-издательский отдел.

Тел.(4712) 22-25-26, тел/факс (4712) 50-48-00.

E-mail: rio_kursk@mail.ru

Изменения и дополнения к правилам оформления статей и информацию об опубликованных номерах можно посмотреть на официальном сайте журнала: **https://swsu.ru/izvestiya/seriesivt/.**