

ISSN 2949-6241
e-ISSN 2949-6233

Инженерные Технологии



№ 1 (9) 2025

16+

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (9), 2025

16+

ENGINEERING TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

№ 1 (9), 2025

«РАЗВИТИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ В 2020 ГОДАХ»

ОЛЕГ ФИГОВСКИЙ

Монография академика Олега Фиговского предлагает читателю его оригинальные обзорные работы последних лет в различных областях современной науки и техники. Данная книга даст читателю достаточно полное и объективное представление об новой идеологии в науке и технике, в том числе и на систематическом анализе патентов, созданных в различных странах мира. В ней рассмотрены в частности вопросы управления инновациями, применение лазеров в обороне и промышленности и пути развития военных технологий. Данная книга написана на основе публикаций за последние годы на английском, китайском, японском и других языках.



Главный редактор

Битюков Виталий Ксенофонтович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), bitukovWK1941@yandex.ru

Заместители главного редактора

Карманова Ольга Викторовна – главный редактор рубрики «Химические технологии, науки о материалах», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии органических соединений и переработки полимеров» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), karolga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Тихомиров Сергей Германович – главный редактор рубрики «Информационные технологии и телекоммуникации», доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), tikhomirov_57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Научно-редакционный совет:

Гусев Борис Владимирович – председатель научно-редакционного совета, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент Российской академии наук, президент Российской инженерной академии (г. Москва, Россия), info-rae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2718-9539>

Алтайлы Сагымбек, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств» Казахского Агротехнического университета им. Сакена Сейфуллина, академик Академии сельскохозяйственных наук Республики Казахстан (г. Астана, Казахстан)

Борейко Наталья Павловна, доктор технических наук, советник директора ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С.В. Лебедева» (г. Санкт-Петербург, Россия), boreicko.natalya@yandex.ru

Люсова Людмила Ромуальдовна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров имени Ф.Ф. Кошелева» Российского технологического университета МИРЭА (г. Москва, Россия), lyusova@mirea.ru

Матвейкин Валерий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные процессы и управление» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), ipu_tstu@mail.ru

Мешалкин Валерий Павлович, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, (г. Москва, Россия), meshalkin.v.p@muctr.ru

Прокопчук Николай Романович, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, профессор кафедры «Полимерные композиционные материалы», Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), nrprok@gmail.com

Редакционная коллегия:

Рубрика «Информационные технологии и телекоммуникации»

Битюков Владимир Ксенофонтович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиоволновые процессы в технологии» Российского технологического университета МИРЭА, (г. Москва, Россия)

Благовещенская Маргарита Михайловна, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, зав. кафедрой «Автоматизированные системы управления биотехнологическими процессами» Московского государственного университета пищевых производств (г. Москва, Россия), mmb@mgupr.ru

Бурлуцкая Мария Шаукатовна, доктор физико-математических наук, доцент, декан математического факультета, зав. кафедрой «Математического моделирования» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия), deanery@math.vsu.ru

Василенко Виталий Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), ucheba@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1547-9814>

Дворецкий Станислав Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки, профессор кафедры «Технология и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), bio-topt@yandex.ru

Зиятдинов Надир Низамович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системотехника» Казанского национального исследовательского технологического университета (г. Казань, Россия), ZiyatdinovNN@corp.knrtu.ru

Карпович Дмитрий Семенович, кандидат технических наук, доцент зав. кафедрой «Автоматизация производственных процессов и электротехника» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь)

Колодежнов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Общепрофессиональных дисциплин» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Колыбанов Кирилл Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные технологии» Российского технологического университета МИРЭА, (г. Москва, Россия)

Куцев Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, полковник, начальник кафедры «Автоматизация систем управления и информационная безопасность» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Лабутин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского химико-технологического университета (г. Иваново, Россия), lan@isuct.ru

Левданский Александр Эдуардович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Процессы и аппараты химических производств» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), alex_levdanskyy@mail.ru

Ли Юэнь, доктор технических наук, доцент Шаньдунского университета архитектуры и технологии (г. Цзинань, Китай), 386093354@qq.com

Матвеев Михаил Григорьевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационных технологий управления» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия), mgmatveev@yandex.ru

Мищенко Сергей Владимирович, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), msv@tstu.ru

Муромцев Дмитрий Юрьевич, проректор по научной работе, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), nauka@tstu.ru

Остриков Александр Николаевич, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), kaf-pahpp@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Подвальный Семен Леонидович, заслуженный деятель науки, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные и вычислительные системы» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), spodvalny@yandex.ru

Провоторов Вячеслав Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Уравнения в частных производных и теория вероятности» Воронежского государственного университета (г. Воронеж, Россия)

Семенов Михаил Евгеньевич, доктор физико - математических наук, профессор, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушной академии им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (г. Воронеж, Россия), mkl150@mail.ru

Скрипников Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), dekuits@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Тростянский Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Физика и химия» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия)

Урбанович Павел Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), p.urbanovich@belstu.by

Хаустов Игорь Анатольевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные и управляющие системы» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), kaf-ius@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Хвостов Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и механика» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), khvtol1974@yandex.ru

Чертов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, советник при ректорате, заведующий кафедрой «Техническая механика» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), post@vsuet.ru

Рубрика «Химические технологии, науки о материалах»

Ваниев Марат Абдурахманович, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров» Волгоградского государственного технического университета (г. Волгоград, Россия), vaniev@vstu.ru

Дворецкий Дмитрий Станиславович, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование пищевых и химических производств» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов, Россия), bio-topt@yandex.ru

Дормекшин Олег Борисович, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Технология неорганических веществ и общая химическая технология» Белорусского государственного технологического университета (г. Минск, Беларусь), dormeshkin@yandex.ru

Иванов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, первый вице-президент, ученый секретарь Российской инженерной академии (г. Москва, Россия), L.a.ivanov@mail.ru

Кучменко Татьяна Анатольевна, доктор химических наук, профессор, профессор РАН, зав. кафедрой «Физическая и аналитическая химия» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), tak1907@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Меньшутина Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химический и фармацевтический инжиниринг» Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (г. Москва, Россия), menshutina.n.v@muctr.ru

Мокшина Надежда Яковлевна, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры «Физика и химия» Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина (г. Воронеж, Россия), moksnad@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8409-024X>

Пугачева Инна Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор, и.о. заведующего кафедрой «Промышленной экологии и техносферной безопасности», декан факультета экологии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), fak-eh@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Рудаков Олег Борисович, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия и химическая технология материалов» Воронежского государственного технического университета (г. Воронеж, Россия), rudakov@vgasu.vrn.ru

Соколова Марина Дмитриевна, доктор технических наук, директор Института проблем нефти и газа СО РАН (ИПНГ СО РАН), обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН» (Республика Саха (Якутия), Россия), marsokol@mail.ru

Суханов Павел Тихонович, доктор химических наук, профессор, советник при ректоре по научно-методической деятельности, профессор кафедры «Физическая и аналитическая химия» Воронежского государственного университета инженерных технологий (г. Воронеж, Россия), pts@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2588-9286>

Цзяньцян Юй, доктор технических наук, профессор лаборатории химии и материалов чистой энергии Университета Циндао (г. Циндао, Китай), jianqyu@qdu.edu.cn

Челноков Виталий Вячеславович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Логистика и экономическая информатика» Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, (г. Москва, Россия), chelnokov.v.v@muctr.ru

Официальный сайт журнала «Инженерные технологии»: <https://vsuet.ru/science/journal-engtech>

Ответственный секретарь: Носова Е. А. (эл. почта: engtech@vsuet.ru)

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: Регистрационный номер ПИ № ФС77-83079 от 07 апреля 2022 г.

Адрес университета, редакции, издательства и отдела полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»
394036, Воронеж, пр-кт Революции, д.19, ауд.445

Контактный тел. +7 (920) 228-20-11

E-mail: engtech@vsuet.ru

Подписано в печать 28.03.2025.

Выход в свет: 31.03.2025.

Формат 70х100 1/8

Усл. печ. л. 17,625. Тираж 100 экз. Заказ №

Цена - свободная

© ФГБОУ ВО

«Воронеж. гос. ун-т инж.
технол.», 2025

Editor-in-Chief

Bitukov Vitaly Ksenofontovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of the Department of Information and Control Systems of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), bitukovWK1941@yandex.ru

Deputy Editors-in-Chief

Karmanova Olga Viktorovna – Editor-in-chief of the heading "Chemical Technologies, Materials Sciences", Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technologies of Organic Compounds and Polymer Processing" Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), karolga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2226-6582>

Tikhomirov Sergey Germanovich – Editor-in-chief of the section "Information Technologies and Telecommunications", Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department "Information and Control Systems" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), tikhomirov_57@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8192-0049>

Scientific and Editorial Board:

Gusev Boris Vladimirovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, President of the Russian Academy of Engineering (Moscow, Russia), info-rae@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2718-9539>

Altayuly Sagymbek, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Technology of food and processing industries" of the Kazakh Agrotechnical University. Sakena Seifullina, Academician of the Academy of Agricultural Sciences of the Republic of Kazakhstan (Astana, Kazakhstan)

Boreyko Natalia Pavlovna, Doctor of Technical Sciences, Advisor to the Director of the S.V. Lebedev Scientific Research Institute of Synthetic Rubber (St. Petersburg, Russia), boreicko.natalya@yandex.ru

Lyusova Lyudmila Romualdovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology processing of elastomers named after F.F. Koshelev" Russian Technological University MIREA (Moscow, Russia), lyusova@mirea.ru

Matveikin Valery Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Processes and Management, Tambov State Technical University (Tambov, Russia), ipu_tstu@mail.ru

Meshalkin Valery Pavlovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Logistics and Economic Informatics of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia), meshalkin.v.p@muctr.ru

Prokopchuk Nikolay Romanovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor of the Department of Polymer Composite Materials, Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), nrprok@gmail.com

Editorial Board:

Heading "Information technology and telecommunications"

Bitukov Vladimir Ksenofontovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Radio Wave Processes in Technology" of the Russian Technological University MIREA, (Moscow, Russia)

Blagoveshchenskaya Margarita Mikhailovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist, Head of the Department "Automated Control Systems for Biotechnological Processes" of the Moscow State University of Food Production (Moscow, Russia), mmb@mgupp.ru

Burlutskaya Maria Shaikatovna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Mathematics, Head of the Department of Mathematical Modeling at Voronezh State University (Voronezh, Russia), deanery@math.vsu.ru

Vasilenko Vitaliy Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Head of the Department "Machines and Devices of Food Production" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), ucheba@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1547-9814>

Dvoretzky Stanislav Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist, Professor of the Department of Technology and Equipment of Food and Chemical Industries of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), bio-topt@yandex.ru

Ziyatdinov Nadir Nizamovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "System Engineering" Kazan National Research Technological University (Kazan, Russia), ZiyatdinovNN@corp.knrtu.ru

Karpovich Dmitry Semenovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Industrial Processes and Electrical Engineering of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus)

Kolodezhnov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "General Professional Disciplines" of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)

Kolybanov Kirill Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Technology of the Russian Technological University MIREA, (Moscow, Russia)

Kushchev Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Colonel, Head of the Department "Automation of Systems management and Information Security" of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (Voronezh, Russia)

Labutin Alexander Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics and Automation" of Ivanovo University of Chemical Technology (Ivanovo, Russia), lan@isuct.ru

Levdansky Alexander Eduardovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Processes and Devices of Chemical Production" of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), alex_levdansky@mail.ru

Li Yueyen, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Shandong University of Architecture and Technology (Jinan, China), 386093354@qq.com

Matveev Mikhail Grigoryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Management Information Technologies at Voronezh State University (Voronezh, Russia), mgmatveev@yandex.ru

Mishchenko Sergey Vladimirovich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechatronics and Technological Measurements of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), msv@tstu.ru

Muromtsev Dmitry Yuryevich, Vice-Rector for Scientific Work, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems" of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), nauka@tstu.ru

Ostrikov Alexander Nikolaevich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology of Fats, Processes and Devices of Chemical and Food Production" of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), kaf-pahpp@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Podvalny Semyon Leonidovich, Honored Scientist, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automated and Computing Systems at Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), spodvalny@yandex.ru

Provotorov Vyacheslav Vasilyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Partial Differential Equations and Probability Theory at Voronezh State University (Voronezh, Russia)

Semenov Mikhail Evgenievich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Military Air Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh, Russia), mkl150@mail.ru

Skrypnikov Alexey Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Security at Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), dekuits@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>

Trostyansky Sergey Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh, Russia)

Urbanovich Pavel Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), p.urbanovich@belstu.by

Khaustov Igor Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information and Control Systems, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), kaf-ius@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8897-5763>

Khvostov Anatoly Anatolyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), khvtol1974@yandex.ru

Chertov Evgeny Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Advisor to the Rector, Head of the Department of Technical Mechanics of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), post@vsuet.ru

Heading "Chemical technologies, materials sciences"

Vaniev Marat Abdurakhmanovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing at Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia), vaniev@vstu.ru

Dvoretzky Dmitry Stanislavovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology and Equipment of Food and Chemical Industries" of Tambov State Technical University (Tambov, Russia), bio-topt@yandex.ru

Dormekshin Oleg Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department "Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology" of the Belarusian State Technological University (Minsk, Belarus), dormeshkin@yandex.ru

Ivanov Leonid Alexeyevich, Candidate of Technical Sciences, First Vice President, Scientific Secretary of the Russian Academy of Engineering (Moscow, Russia), L.a.ivanov@mail.ru

Kuchmenko Tatyana Anatolyevna, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Physical and Analytical Chemistry of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), tak1907@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Menshutina Natalia Vasilyevna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical and Pharmaceutical Engineering of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (Moscow, Russia), menshutina.n.v@muctr.ru

Mokshina Nadezhda Yakovlevna, Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics and Chemistry of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy (Voronezh, Russia), moksna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8409-024X>

Pugacheva Inna Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Dean of the Faculty of Ecology and Chemical Technology, Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), fak-eh@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Rudakov Oleg Borisovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology materials of the Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia), rudakov@vgsu.vrn.ru

Sokolova Marina Dmitrievna, Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS (IPNG SB RAS), a separate division of the Federal State Budgetary Educational Institution of the Federal Research Center "Yakut Scientific Center SB RAS" (Republic of Sakha (Yakutia), Russia), marsokol@mail.ru

Sukhanov Pavel Tikhonovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Advisor to the Rector for Scientific and Methodological Activities, Professor of the Department of Physical and Analytical Chemistry of the Voronezh State University of Engineering Technologies (Voronezh, Russia), pts@vsuet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2588-9286>

Jianqiang Yu, Doctor of Technical Sciences, Professor, Laboratory of Chemistry and Clean Energy Materials, Qingdao University (Qingdao, China), jianqyu@qdu.edu.cn

Chelnokov Vitaly Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Logistics and Economic Informatics, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, (Moscow, Russia), chelnokov.v.v@muctr.ru

The official website of the Engineering Technologies magazine: <https://vsuet.ru/science/journal-engtech>
Executive Secretary: Nosova E. A. (e-mail: engtech@vsuet.ru)

Founder: Voronezh State University of Engineering Technologies

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications: Registration number PI No. FS77-83079 dated April 07, 2022.

The address of the University, the editorial office, the publishing house and the printing department of VSUIT:

394036, Voronezh, Revolution Ave., 19, room 445

Contact tel.+7 (920) 228-20-11

E-mail: engtech@vsuet.ru

Signed to the press on 28.03.2025.

The publication: 31.03.2025.

Format 70 x 100 1/8

Usl. pech. l. 17,625. Edition of 100 copies. Order No.

Price - free

© FSBEI HE

«Voronezh State University of
Engineering and Technology»,
2025

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и телекоммуникации

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ <i>Дворникова Е. М.</i>	15
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕМПЕРАТУРУ В ПОМЕЩЕНИИ <i>Донских Д. П., Воронцов Я. А.</i>	22
МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА <i>Хныкин Д. Е., Коробова Л. А.</i>	30
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ JAVA ФРЕЙМВОРКОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МИКРОСЕРВИСОВ <i>Поздняков П. И.</i>	36
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОТОКОЛА SSH <i>Воронцов Ю. А., Михайлова Е. К.</i>	42
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ И ГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ <i>Савотченко С. Е.</i>	52
ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ПОРЯДКА ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ГИЛЬБЕРТА В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ <i>Герасимова В. И.</i>	61
ПОВЕДЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ТОЧКИ КАК ИНДИКАТОР ПОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РЯДА <i>Матвеев М. Г., Рудаков Е. В.</i>	71
ПРИМЕНЕНИЕ IT-РЕШЕНИЙ ДЛЯ КАРЬЕРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ <i>Клоков С. А., Бирюкова А. А.</i>	79
СБОР ДАННЫХ С WILDBERRIES ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЙ МОДЕЛИ КОНКУРЕНЦИИ НА МАРКЕТПЛЕЙСЕ <i>Часовских И. А., Матвеев М. Г.</i>	89
СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИНЦИДЕНТОВ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ <i>Авакян А. А., Литвинов Д. А., Коробова Л. А.</i>	104
КЛИЕНТ-СЕРВЕРНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ АВТОРСКОГО КОНТЕНТА ОТ НЕЗАКОННОГО КОПИРОВАНИЯ <i>Хромых Е. А., Андросов И. Ю.</i>	109

Химические технологии, науки о материалах

ПРИМЕНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СМЕСЕВЫХ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ФАРМПРЕПАРАТОВ <i>Комарова Е. В., Болотов В. М., Комаров И. А., Саввин П. Н.</i>	121
КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАПОЛНЕННОГО ПОЛИСАХАРИДАМИ ПОЛИЭТИЛЕНА: ПОЛУЧЕНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ <i>Студеникина Л. Н., Протасов А. В., Мельников А. А., Поваляева Т. Р., Леонова А. А.</i>	126
РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ГИДРОФИЛЬНЫХ ДОБАВОК <i>Карманова О. В., Москалев А. С., Казакова А. С., Москалев П. С., Федоров С. М.</i>	134

CONTENTS

Information technology and telecommunications

ANALYSIS OF INDICATORS OF BIOTECHNOLOGICAL ENVIRONMENTS BASED ON COMPUTER METHODS OF INFORMATION PROCESSING <i>Dvornikova E. M.</i>	15
DETERMINATION OF THE TASK OF CONTROLLING A HEATING SYSTEM: DETERMINING THE PARAMETERS THAT AFFECT THE TEMPERATURE IN THE ROOM <i>Donskikh D. P., Vorontsov Y. A.</i>	22
METHODOLOGY AND RESULTS OF APPLICATION REVERSE ENGINEERING <i>Khnykin D. E., Korobova L. A.</i>	30
COMPARATIVE ANALYSIS OF JAVA FRAMEWORKS FOR MICROSERVICES DEVELOPMENT <i>Pozdniakov P. I.</i>	36
INTERNET OF THINGS DEVICE MANAGEMENT SYSTEM USING SSH PROTOCOL <i>Vorontsov Yu. A., Mikhailova E. K.</i>	42
MODELING OF WAVE PROCESSES IN NONLINEAR AND GRADIENT OPTICAL CRYSTALS BASED ON NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH DISTRIBUTED COEFFICIENTS <i>Savotchenko S. E.</i>	52
FEATURES OF CHOOSING THE ORDER OF THE DIGITAL HILBERT FILTER IN SIGNAL ANALYSIS TASKS <i>Gerasimova V. I.</i>	61
STATIONARY POINT BEHAVIOR AS AN INDICATOR OF TIME SERIES BEHAVIOR <i>Matveev M. G., Rudakov E. V.</i>	71
APPLICATION OF IT SOLUTIONS FOR CAREER PLANNING <i>Klokov S. A., Biryukova A. A.</i>	79
COLLECTING DATA FROM WILDBERRIES TO BUILD A GAME-THEORETIC MODEL OF COMPETITION ON THE MARKETPLACE <i>Chasovskikh I. A., Matveev M. G.</i>	89
SYSTEMATIZATION OF SOFTWARE INCIDENTS <i>Avakyan A. A., Litvinov D. A., Korobova L. A.</i>	104
CLIENT-SERVER APPROACH IN DESIGNING METHODS FOR PROTECTING COPYRIGHTED CONTENT FROM ILLEGAL COPYING <i>Khromykh E. A., Androsov I. Yu.</i>	109

Chemical technologies, materials sciences

THE USE OF DOMESTIC MIXED BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS FOR THE PRODUCTION OF NEW PHARMACEUTICAL PRODUCTS <i>Komarova E. V., Bolotov V. M., Komarov I. A., Savvin P. N.</i>	121
COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYSACCHARIDE-FILLED POLYETHYLENE: PRODUCTION, APPLICATION, DISPOSAL <i>Studenikina L.N., Protasov A. V., Melnikov A. A., Povalyaeva T. R., Leonova A. A.</i>	126
COMPOUNDING SOLUTIONS FOR OBTAINING WATERPROOFING ELASTOMERIC MATERIALS BASED ON A COMBINATION OF HYDROPHILIC ADDITIVES <i>Karmanova O. V., Moskalev A. S., Kazakova A. S., Moskalev P. S., Fedorov S. M.</i>	134

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ОСНОВЕ
КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Екатерина Михайловна Дворникова

e.m.dvornikova@gmail.com

МИРЭА - Российский технологический университет, проспект Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия

Аннотация. В статье приведено описание регрессионного анализа экспериментальных данных процесса вакуумной сублимационной сушки йогуртов. В процессе анализа были получены уравнения зависимости выживаемости кислomолочных бактерий от других показателей, полученных в ходе сублимации. Проведен анализ адекватности каждой из полученных моделей.

Ключевые слова: регрессионный анализ, адекватность модели, коэффициент детерминации, F-критерий Фишера, вакуумная сублимационная сушка.

Для цитирования: Дворникова Е. М. Анализ показателей биотехнологических сред на основе компьютерных методов обработки информации // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 15-21.

Original article

**ANALYSIS OF INDICATORS OF BIOTECHNOLOGICAL ENVIRONMENTS BASED ON
COMPUTER METHODS OF INFORMATION PROCESSING**

Ekaterina M. Dvornikova

e.m.dvornikova@gmail.com

MIREA – Russian Technological University, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russia

Annotation. The article describes the regression analysis of experimental data on the process of vacuum freeze drying of yoghurts. During the analysis, equations of dependence of the survival rate of fermented milk bacteria on other indicators obtained during sublimation were obtained. The adequacy of each of the obtained models is analyzed.

Keywords: regression analysis, model adequacy, coefficient of determination, Fisher's F-criterion, vacuum freeze drying.

For citation: Dvornikova E. M. Analysis of indicators of biotechnological environments based on computer methods of information processing. *Ingenernye tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 15-21. (In Russ.).

Введение

Современное состояние технологий, обеспечивающих длительную сохранность сырьевых ресурсов для производства продуктов питания, готовых продуктов питания, а также лекарственных препаратов, ферментов и заквасок и многих других термолабильных материалов является важнейшим фактором устойчивого развития цивилизации на современном этапе. Одной из таких технологий по праву считается вакуумная сублимационная сушка [1].

Материал и методы исследования

Сублимационная сушка является одной из самых перспективных технологий в переработке молочных продуктов, в частности йогуртов. Это метод позволяет эффективно удалять влагу из продукта, сохраняя при этом его пита-

тельные вещества, аромат и вкус. В условиях современного потребительского рынка, где востребованы натуральные и полезные продукты с длительным сроком хранения, сублимация представляет собой оптимальное решение. Обработка йогуртов с использованием данной технологии не только значительно увеличивает срок годности готовой продукции, но и улучшает её транспортируемость и удобство хранения.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе проведения данного исследования была проведена вакуумная сублимационная сушка йогуртов без добавок при температуре от -40°C до -5°C , а также составлена таблица полученных функционально-технологических показателей (таблица 1) [2, 3].

Таблица 1. Экспериментальные данные сублимации йогуртов

Table 1. Experimental data on yogurt sublimation

Температура сублимации / Sublimation temperature, °C	pH	Титруемая кислотность / Titrated acidity	Антиоксидантная активность / Antioxidant activity	Соотношение насыщенных жиров к мононенасыщенным жирам / The ratio of saturated fats to monounsaturated fats	Выживаемость / Survival rate
-40	4,49	82	40,2	2,08	79,50
-25	4,50	81	39,9	2,21	79,50
-15	4,52	80	38,4	2,23	54,97
-10	4,57	78	37,8	2,32	4,53
-5	4,58	75	37,2	2,36	4,13

При проведении вакуумного обезвоживания есть возможность изменять температуру и длительность сушки, в зависимости от этого меняются показатели объекта сублимации. Самым важным показателем для йогуртов является выживаемость кислomолочных бактерий. Исходя из этого, основная задача - создание системы оптимизации температуры и длительности процесса сушки, которые обеспечат максимальную выживаемость полезных микроорганизмов.

Для решения поставленной задачи была выявлена зависимость выживаемости от дру-

гих полученных показателей при помощи применения методов математического моделирования [4, 5], системного анализа, регрессионного анализа и компьютерной обработки данных: были построены графики зависимостей и добавлены на них линии тренда. Полученные результаты представлены на рисунках 1-5.

При построении графиков зависимости выживаемости микроорганизмов от температуры сублимации построить степенную и экспоненциальную линии тренда невозможно, так как аргумент, то есть температура, имеет отрицательные значения (рисунок 5).

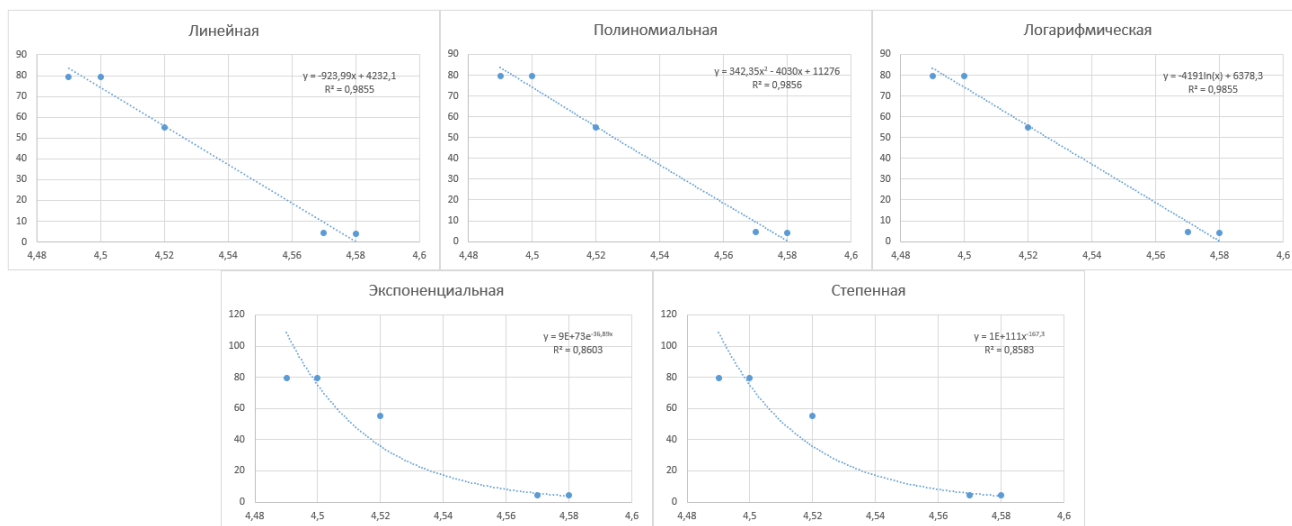


Рисунок 1. Графики зависимости выживаемости от pH

Figure 1. Graphs of the dependence of survival on pH

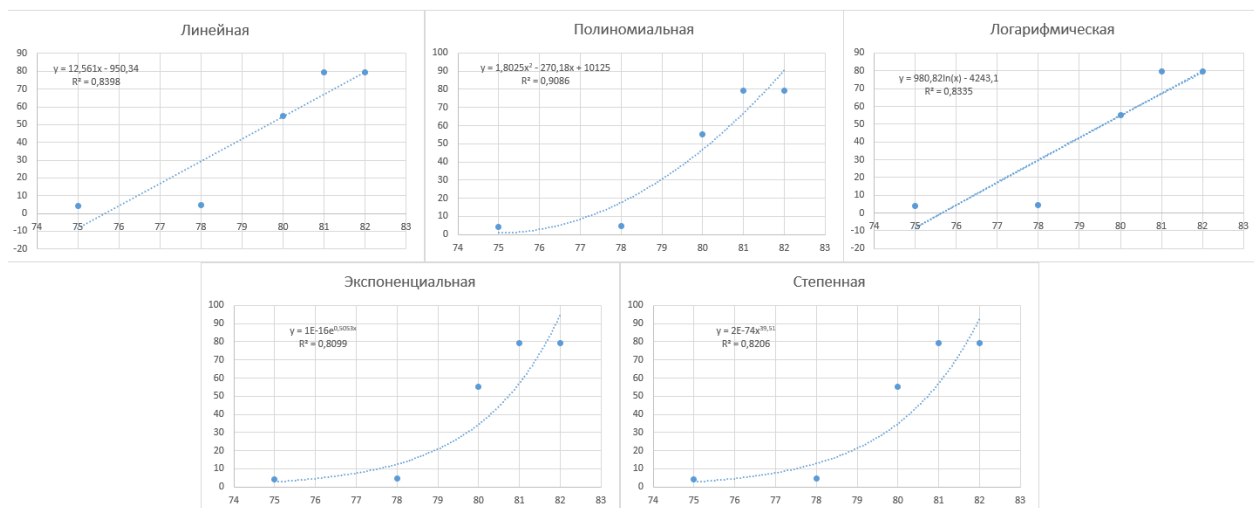


Рисунок 2. Графики зависимости выживаемости от титруемой кислотности

Figure 2. Graphs of the dependence of survival on titrated acidity

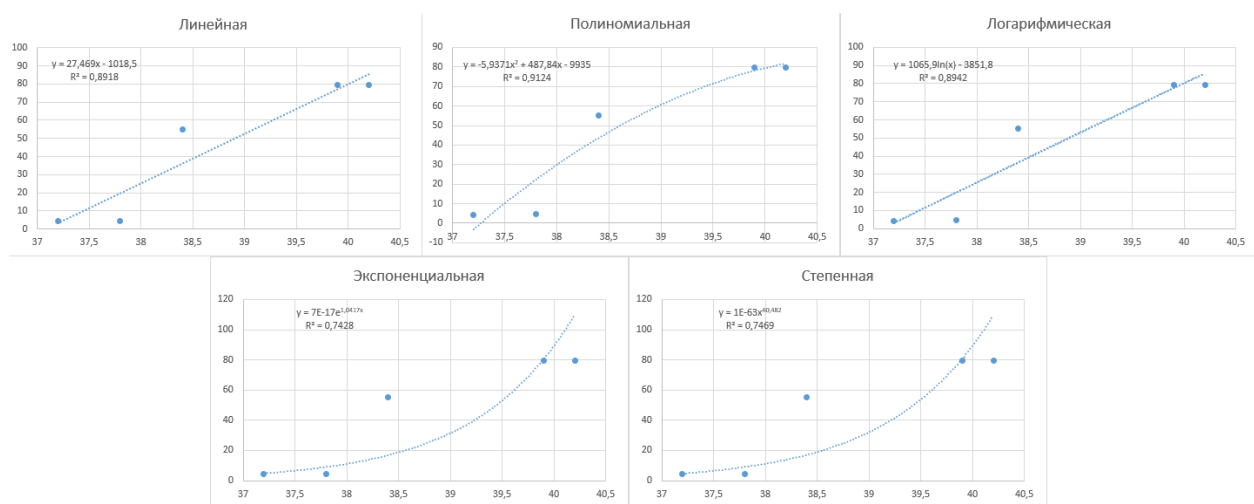


Рисунок 3. Графики зависимости выживаемости от антиоксидантной активности

Figure 3. Graphs of the dependence of survival on antioxidant activity

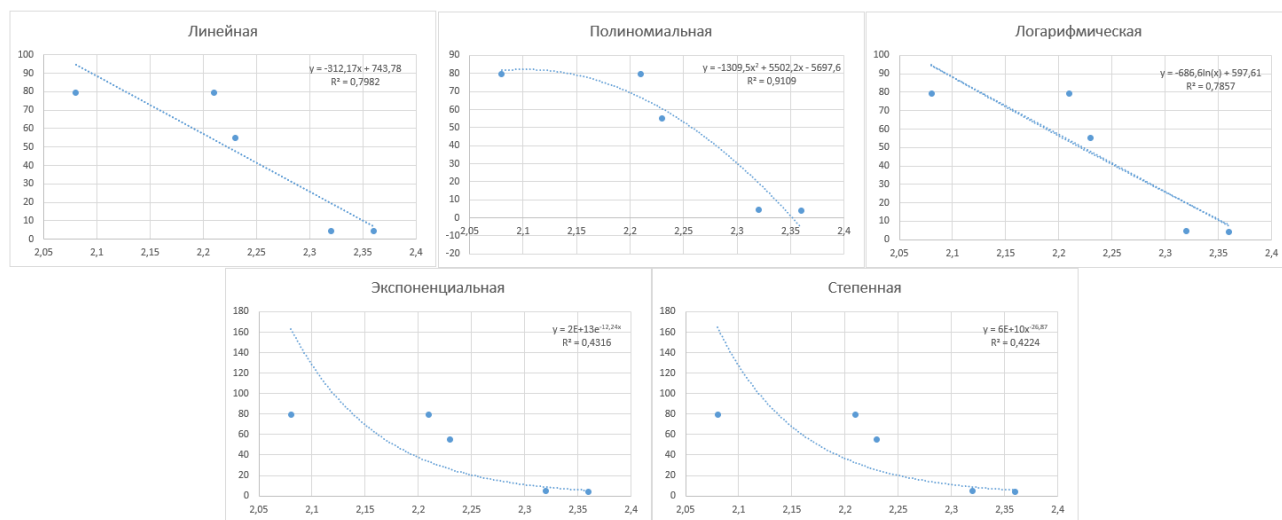


Рисунок 4. Графики зависимости выживаемости от соотношения насыщенных жиров к мононенасыщенным жирам

Figure 4. Graphs of the dependence of survival on the ratio of saturated fats to monounsaturated fats

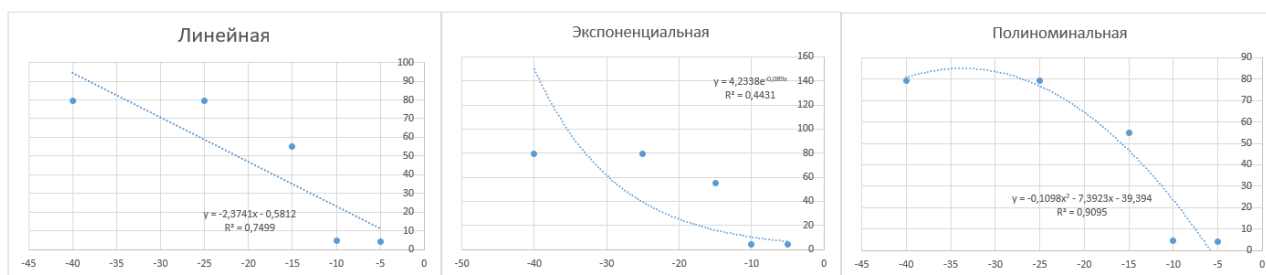


Рисунок 5. Графики зависимости выживаемости от температуры сублимации

Figure 5. Graphs of the dependence of survival on the sublimation temperature

Для дальнейшего анализа были получены уравнения зависимостей. Для определения адекватности полученных математических мо-

делей рассчитан коэффициент достоверности аппроксимации R^2 (таблица 2) [6].

Таблица 2. Коэффициенты достоверности аппроксимации полученных зависимостей

Table 2. Coefficients of confidence in the approximation of the obtained dependencies

Показатели / Indicators	Вид зависимости / Type of dependence	Коэффициент достоверности аппроксимации / Coefficient of approximation reliability
Температура сублимации, °C	Экспоненциальная	Невозможно получить зависимость, так как аргумент имеет отрицательные значения
	Линейная	0,7499
	Логарифмическая	0,4431
	Полиномиальная	0,9095
	Степенная	Невозможно получить зависимость, так как аргумент имеет отрицательные значения
pH	Экспоненциальная	0,8603
	Линейная	0,9855
	Логарифмическая	0,9855
	Полиномиальная	0,9856
	Степенная	0,8583
Титруемая кислотность	Экспоненциальная	0,8099
	Линейная	0,8398
	Логарифмическая	0,8335
	Полиномиальная	0,9086
	Степенная	0,8206
Антиоксидантная активность	Экспоненциальная	0,7428
	Линейная	0,8918
	Логарифмическая	0,8942
	Полиномиальная	0,9124
	Степенная	0,7469
Соотношение насыщенных жиров к мононенасыщенным жирам	Экспоненциальная	0,4316
	Линейная	0,7982
	Логарифмическая	0,7857
	Полиномиальная	0,9109
	Степенная	0,4224

Если коэффициент детерминации больше 0,9, то можно считать, что модель адекватна, но оценивать правильность модели только на основании показателя R^2 некорректно, по-

этому также, для каждой модели, был рассчитан F-критерий Фишера [7], результаты отображены в таблице 3.

Таблица 3. F-критерии Фишера полученных зависимостей

Table 3. Fischer's F-criteria for the obtained dependencies

Показатели / Indicators	Вид зависимости / Type of dependence	Коэффициент достоверности аппроксимации / Coefficient of approximation reliability	F-критерий Фишера / Fischer's F-criterion
Температура сублимации, °C	Экспоненциальная	Невозможно получить зависимость, так как аргумент имеет отрицательные значения	
	Линейная	0,7499	8,9952
	Логарифмическая	0,4431	2,3870
	Полиномиальная	0,9095	30,1492
	Степенная	Невозможно получить зависимость, так как аргумент имеет отрицательные значения	
рН	Экспоненциальная	0,8603	18,4746
	Линейная	0,9855	203,8966
	Логарифмическая	0,9855	203,8966
	Полиномиальная	0,9856	205,3333
	Степенная	0,8583	18,1715
Титруемая кислотность	Экспоненциальная	0,8099	12,7812
	Линейная	0,8398	15,7266
	Логарифмическая	0,8335	15,0180
	Полиномиальная	0,9086	29,8228
	Степенная	0,8206	13,7224
Антиоксидантная активность	Экспоненциальная	0,7428	8,6641
	Линейная	0,8918	24,7264
	Логарифмическая	0,8942	25,3554
	Полиномиальная	0,9124	31,2466
	Степенная	0,7469	8,8530
Соотношение насыщенных жиров к моновенасыщенным жирам	Экспоненциальная	0,4316	2,2780
	Линейная	0,7982	11,8662
	Логарифмическая	0,7857	10,9991
	Полиномиальная	0,9109	30,6700
	Степенная	0,4224	2,1939

Для проверки адекватности математической модели при помощи F-критерия Фишера необходимо сравнить полученное значение с табличным, в нашем случае табличное значение равно 10,13 при уровне значимости 0,05.

Выводы

Исходя из полученных данных были отобраны оптимальные уравнения зависимости выживаемости от каждого из показателей.

Таблица 4. Зависимость выживаемости кисломолочных бактерий от функционально-технологических показателей йогурта

Table 4. Dependence of the survival rate of lactic acid bacteria on the functional and technological indicators of yogurt

Показатель / Indicator	Уравнение зависимости / The equation of dependence
Температура сублимации, °C	$y = -0,1098x^2 - 7,3923x - 39,394$
рН	$y = 342,35x^2 - 4030x + 11276$
Титруемая кислотность	$y = 1,8025x^2 - 270,18x + 10125$
Антиоксидантная активность	$y = -5,9371x^2 + 487,84x - 9935$
Соотношение насыщенных жиров к моновенасыщенным жирам	$y = -1309,5x^2 + 5502,2x - 5697,6$

Таким образом, после проведенного регрессионного анализа были выявлено, что для описания зависимости выживаемости от каж-

дого из показателя наиболее точной будет полиномиальная модель второй степени [8].

Литература

1. Мохова Е.К., Пальчикова В.В., Гордиенко М.Г. Математическое моделирование тепло- и массообмена в процессе вакуумной сублимационной сушки // Успехи в химии и химической технологии. 2020. №6 (229). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-teplo-i-massoobmena-v-protssesse-vakuumnoy-sublimatsionnoy-sushki> (дата обращения: 27.11.2024).
2. Семенов, Г. В. Управление качеством сублимированных продуктов растительного происхождения / Г. В. Семенов, И. С. Краснова // Актуальные вопросы товароведения, безопасности товаров и экономики : Сборник научных статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Коломна, 23–24 марта 2018 года / Под редакцией А.Н. Столяровой. – Коломна: Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Государственный социально-гуманитарный университет", 2018. – С. 360-364.
3. Краснова И.С., Семенов Г.В., Гучок Ж.Л. Кисломолочные сублимированные продукты питания для населения, работающего в условиях крайнего севера// Российская Арктика. – 2022. – №19. – С. 61-67.
4. Николаева С.В. Математическое моделирование смесей жидких сред: Учебник. – М.: Издательство «Спутник +», 2024. – 104 с.
5. Николаева С.В., Дворникова Е.М. Математическое моделирование смеси с использованием термодинамики // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 1. – С. 26-27.
6. Карлберг, К. Регрессионный анализ в Microsoft Excel / К. Карлберг. - М.: Диалектика, 2019. - 400 с.
7. Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник / В.А. Колемаев, В.Н. Калинина. - М.: КноРус, 2017. - 304 с.
8. Дворникова Е.М., Николаева С.В., Параскевопуло О.Р. Математическое обеспечение системы оптимизации процесса сублимации продуктов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 9. – С. 83-85.

References

1. Mokhova E.K., Palchikova V.V., Gordienko M.G. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the process of vacuum freeze drying // Advances in chemistry and chemical technology. 2020. No. 6 (229). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-teplo-i-massoobmena-v-protssesse-vakuumnoy-sublimatsionnoy-sushki> (date of request: 11/27/2024).
2. Semenov, G. V. Quality management of freeze-dried products of vegetable origin / G. V. Semenov, I. S. Krasnova // Topical issues of commodity science, product safety and economics : A collection of scientific articles based on the results of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International participation, Kolomna, March 23-24, 2018 / Edited by A.N. Stolyarova. Kolomna: State Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region "State Social and Humanitarian University", 2018, pp. 360-364.
3. Krasnova I.S., Semenov G.V., Guchok Zh.L. Fermented freeze-dried food products for the population working in the Far north// The Russian Arctic. – 2022. – No. 19. – pp. 61-67.
4. Nikolaeva S.V. Mathematical modeling of mixtures of liquid media: Textbook. – M.: Publishing house "Sputnik +", 2024. – 104 p.
5. Nikolaeva S.V., Dvornikova E.M. Mathematical modeling of a mixture using thermodynamics // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. – 2024. – No. 1. – pp. 26-27.
6. Karlberg, K. Regression analysis in Microsoft Excel / K. Karlberg. - M.: Dialektika, 2019. - 400 p.
7. Kolemaev, V.A. Probability theory and mathematical statistics. Textbook / V.A. Kolemaev, V.N. Kalinina. Moscow: KnoRus, 2017. 304 p.
8. Dvornikova E.M., Nikolaeva S.V., Paraskevopulo O.R. Mathematical support for the system of product sublimation process optimization // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. - 2024. – No. 9. – pp. 83-85.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Дворникова Екатерина Михайловна	старший преподаватель, МИРЭА – Российский технологический университет, e.m.dvornikova@gmail.com SPIN-код: 5174-1885

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Dvornikova Ekaterina Mihailovna	Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University, e.m.dvornikova@gmail.com SPIN-code: 5174-1885

статья поступила в редакцию 02.12.2024	одобрена после рецензирования 14.01.2025	принята к публикации 27.01.2025
the article was submitted 02.12.2024	approved after reviewing 14.01.2025	accepted for publication 27.01.2025

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕМПЕРАТУРУ В ПОМЕЩЕНИИ

Дмитрий Павлович Донских✉

¹

steamdiver@yandex.ru

Ярослав Александрович Воронцов

¹

Jessy-Black0990@yandex.ru

¹Воронежский государственный университет, ул. Университетская площадь, 1, Воронеж, 394018, Россия

Аннотация. В данной работе определяется вид зависимости температуры воздуха в помещении от различных факторов, таких как температура на улице, характер и качество утепления помещения, количество человек и др. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки оптимального алгоритма для автоматического поддержания комфортных условий.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, управление температурой, умный дом

Для цитирования: Донских Д. П., Воронцов Я. А. Постановка задачи управления системой отопления: определение параметров, влияющих на температуру в помещении // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 22-29.

Original article

DETERMINATION OF THE TASK OF CONTROLLING A HEATING SYSTEM: DETERMINING THE PARAMETERS THAT AFFECT THE TEMPERATURE IN THE ROOM

Dmitriy P. Donskikh✉

¹

steamdiver@yandex.ru

Yaroslav A. Vorontsov

¹

Jessy-Black0990@yandex.ru

¹Voronezh State University, Universitetskaya Square 1, Voronezh, 394018, Russia

Abstract. This work determines the type of dependence of indoor air temperature on various factors, such as outdoor temperature, the nature and quality of the insulation of the room, the number of people, etc. The relevance of this study is due to the need to develop an optimal algorithm for automatically maintaining comfortable conditions.

Keywords: thermal load, temperature control, smart home.

For citation: Donskikh D. P., Vorontsov Y. A. Determination of the task of controlling a heating system: determining the parameters that affect the temperature in the room. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (1 (9)): 22-29. (In Russ.).

Введение

Автоматическое поддержание комфортных условий в помещении является одной из ключевых задач систем умного дома. Многие системы позволяют задать поддерживаемую температуру вручную. Однако, понятие комфортных условий может варьироваться, во-первых, в зависимости от личных предпочтений, и во-вторых, от условий окружающей среды, что значительно усложняет задачу. Так, ГОСТ [1] и СанПин [2] установлены оптимальные и допустимые показатели микроклимата, согласно которым комфортная температура воздуха в помещении летом составляет 22–25 °С, зимой 20–22 °С.

Индивидуальные предпочтения комфортной температуры варьируются. Некоторые люди предпочитают прохладу, в то время как другим нравится более высокая температура. Эти предпочтения могут меняться в за-

висимости от времени суток и вида активности. Кроме того, во время сна врачи рекомендуют поддерживать более низкую температуру в спальне [3][4] для поддержания нормальной работы организма.

Внешние условия также играют значительную роль в создании комфортных условий. Температура на улице, влажность, солнечная активность могут существенно влиять на степень комфортности поддерживаемой температуры. Например, в солнечный день температура в комнате с окнами на юг может быть значительно выше, чем в других.

Сама задача поддержания комфортной температуры не является тривиальной и требует учета различных факторов для управления системой поддержания климатом [6][7]. Необходимо учесть теплоизоляцию здания, количество окон и их ориентацию, наличие других источников тепла и назначения помещений. Многообразие подобных факторов приводит к

необходимости детального изучения их влияния на температуру.

Материал и методы исследования

Определение вида зависимости температуры в помещении от различных параметров является важной задачей. Знание вида данной зависимости позволяет исключить незначительные параметры из модели и по возможности привести её к линейному виду, что важно с точки зрения управления, поскольку для линейной зависимости гораздо проще построить алгоритм управления.

Будем рассматривать помещение (открытую систему), обладающее окнами, конвектором отопления и имеющую неидеальную теплоизоляцию от внешней среды. Таким образом, рассмотренными факторами, приводящими к изменению температуры воздуха в системе, являются: теплопотери через стены, пол, окна и потолок, энергия, добавленная солнечным излучением, проникающая через остекление, энергия, выделенная системой отопления и тепловое излучение находящихся внутри людей.

Составим уравнение теплового баланса при сохранении постоянной температуры воздуха в системе:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{потерь}} \quad (1)$$

Для определения величины потерь используем коэффициент сопротивления теплопередаче (то есть переносу теплоты через ограждающую конструкцию от среды с более высокой температурой к среде с более низкой температурой) - величина, принятая для оценки теплозащитных характеристик материалов или конструкций, обратная коэффициенту теплопроводности или теплопередачи. Данный коэффициент рассчитывается как отношение разности температур внутренней и внешней поверхностей однородной ограждающей конструкции к количеству теплоты, проходящему через ограждающую конструкцию в единицу времени, отнесенному к площади расчетной

конструкции и имеет размерность $\left[\frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}} \right]$.

Таким образом, можно определить величину теплопотерь через некоторую поверхность по следующей формуле:

$$P = \frac{S \Delta T}{k}, \quad (2)$$

где S - площадь поверхности, ΔT - разница температур сред, разделенных данной поверхностью, k - коэффициент теплового сопротивления.

Общая величина теплопотерь будет выглядеть следующим образом:

$$P_{\text{теплопередачи}} = \frac{S_{\text{стен}} \Delta T}{k_{\text{стен}}} + \frac{S_{\text{окон}} \Delta T}{k_{\text{окон}}} + \frac{S_{\text{потолка}} \Delta T}{k_{\text{потолка}}} + \frac{S_{\text{пола}} \Delta T}{k_{\text{пола}}}, \quad (3)$$

где ΔT принимается как разница температур внутри и снаружи.

Количество энергии, получаемой от Солнца через окна, можно определить по следующей формуле:

$$P_{\text{солн}} = S_{\text{окон}} P_{\text{irr}}, \quad (4)$$

где P_{irr} - мощность солнечного излучения [$\text{Вт}/\text{м}^2$], падающего на поверхность (GTI - Global Titled Irradiance[5]).

Тепловую мощность, выделяемую одним человеком, находящимся в помещении, можно принять постоянным и, согласно исследованиям, равным 120Вт при умеренной физической работе. Тепловую мощность системы отопления обозначим W .

Объединяя все вышеизложенное, получим:

$$P_{\text{потерь}} = P_{\text{теплопередачи}} + P_{\text{солн}} + nP + W \quad (5)$$

$$\Delta T \left(\frac{S_{\text{стен}} \Delta T}{k_{\text{стен}}} + \frac{S_{\text{окон}} \Delta T}{k_{\text{окон}}} + \frac{S_{\text{потолка}} \Delta T}{k_{\text{потолка}}} + \frac{S_{\text{пола}} \Delta T}{k_{\text{пола}}} \right) = S_{\text{окон}} P_{\text{irr}} + 120n + W \quad (6)$$

Пусть

$$\frac{S_{\text{стен}} \Delta T}{k_{\text{стен}}} + \frac{S_{\text{окон}} \Delta T}{k_{\text{окон}}} + \frac{S_{\text{потолка}} \Delta T}{k_{\text{потолка}}} + \frac{S_{\text{пола}} \Delta T}{k_{\text{пола}}} = k_{\text{потерь}} \quad (7)$$

Тогда

$$T - T_{\text{вн}} = \frac{S_{\text{окон}} P_{\text{irr}} + 120n + W}{k_{\text{потерь}}} \quad (8)$$

$$T = T_{\text{вн}} + \frac{S_{\text{окон}} P_{\text{irr}} + 120n + W}{k_{\text{потерь}}} \quad (9)$$

Таким образом, видим, что функция температуры внутри помещения имеет линейный вид.

В данной работе будет использоваться понятие тепловой нагрузки помещения. Тепловая нагрузка помещения — это количество тепла, которое необходимо доставить в помещение для поддержания в нем заданной температуры в холодный период времени или отвести из него в теплый период. Это значение измеряется в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт) и включает в себя все источники теплопоступлений и теплопотерь, такие как окна, стены, крыши, оборудование, освещение, а также тепловыделения от людей. Определение тепловой нагрузки позволяет правильно подобрать мощность систем контроля температуры, например, конвекторов или кондиционеров, что позволяет избежать избыточной мощности оборудования и снизить эксплуатационные затраты.

В данной работе построение графика тепловой нагрузки позволит подтвердить или опровергнуть гипотезу о линейном виде зависимости температуры в помещении от внешней температуры.

Результаты исследования и их обсуждение

Для управления системой отопления была разработана собственная система без использования готовых решений умного дома от коммерческих производителей. Разработанная система позволяет управлять системой отопления автономно без необходимости подключения к сети Интернет. Дополнительно реализован сбор статистических данных для последующего анализа. Для реализации использованы следующие технологии: Blazor Server, ASP.NET. В качестве сервера для обработки и хранения данных используется Raspberry Pi 4, 4Гб ОЗУ.

Для управления нагревательными элементами (электрическими конвекторами) используется программно реализованный PID регулятор с возможностью настройки коэффициентов с использованием графического интерфейса. Для коммутации нагрузки используются твердотельные реле.

Для измерения температуры используются беспроводные датчики, реализованные на базе микроконтроллера ESP8266 и датчика температуры АНТ10. Выбранные компоненты позволяют реализовать беспроводную переда-

чу данных о температуре и влажности в каждом из помещений с точностью $\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\pm 2\%$ и разрешающей способностью $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ и 0.024% соответственно. В ходе эксплуатации датчик температуры АНТ10 был сравнен с более распространенным DHT22. Была выявлена практически полная непригодность датчика DHT22 к использованию в системах поддержания температуры в помещении из-за его небольшой разрешающей способности и высоким разбросом значений, что может приводить к нестабильной работе PID регулятора.

Получение и обработка данных происходит с периодом 60с. Данный период был получен экспериментально и позволяет сохранить достаточную отзывчивость системы на изменения температуры. Увеличение данного интервала приводит к снижению скорости реакции системы на изменение температуры, что приводит к ошибкам регулирования. Уменьшение периода получения данных было определено как нецелесообразным ввиду большой инерционности системы и относительно долгой реакцией на воздействие в виде включения нагревателя.

С течением времени остро встал вопрос хранения большого объема статистических данных. Изначально система проектировалась для работы с файловой СУБД SQLite. С хранением возросшего количества данных данная СУБД справлялась удовлетворительно, но не позволяла обеспечить многопоточный режим чтения/записи данных в одну и ту же таблицу. В связи с этим были рассмотрены time-series БД, которые более оптимизированы для задачи хранения временных рядов. После рассмотрения нескольких вариантов, выбор пал на InfluxDb. Хранение данных в этой БД позволило значительно уменьшить время, необходимое для записи и чтения значений температуры. Дополнительно, InfluxDb позволяет строить графики с использованием своего языка Flux, что значительно упрощает анализ данных без необходимости использования дополнительных сервисов, таких как Grafana.

Для проверки полученных результатов был проведен анализ фактических статистических данных с помощью встроенных инструментов InfluxDb. Для этого был использован период 1.03.2024 – 1.06.2024. По оси абсцисс – разница температур $T - T_{\text{вн}}$, по оси ординат – затраченная энергия кВт*ч.

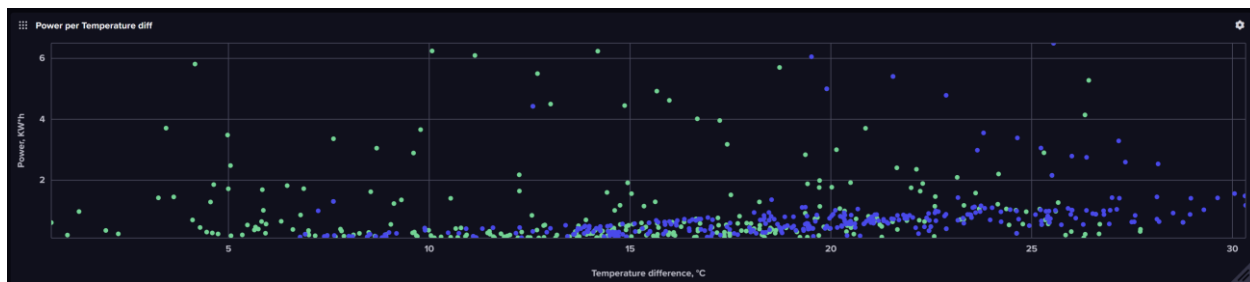


Рисунок 1. График тепловой нагрузки

Figure 1. Temperature load chart

На рисунке 1 можно видеть скопление точек вдоль некоторой прямой, что доказывает гипотезу о линейном характере зависимости температуры воздуха в помещении от температуры воздуха на улице. Синие точки отображают ночные данные, зеленые – дневные. Выбросы, которые так же присутствуют на рисунке, связаны с особенностями режима отопления рассматриваемого помещения. Поддерживаемая температура варьировалась от 15 градусов в режиме отсутствия людей до 25 градусов при их присутствии. В связи с

этим в системе отопления, управляемой PID регулятором, наблюдались скачки выделяемой мощности при переходном процессе. Однако через некоторое непродолжительное время регулятор выходил на стабильный режим с незначительными колебаниями мощности. График работы контроллера отопления представлен на рисунке 2. На нем видны описанные выше процессы, происходящие при резком изменении целевой температуры, и периоды работы в установившемся режиме.

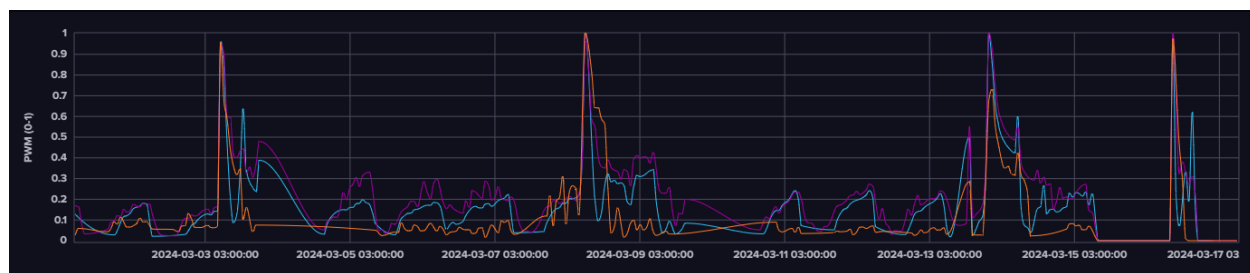


Рисунок 2. График мощности

Figure 2. Power chart

Для более детального изучения результатов было принято решение произвести фильтрацию выбросов и построить график с использованием собственной системы умного дома. При этом были отброшены точки, отражающие периоды, в которых температура бы-

ла нестабильной (колебания более 0.25 градуса от средней величины). Дополнительно с использованием метода линейной регрессии были построены линии тренда. Результаты можно видеть на рисунке 3.

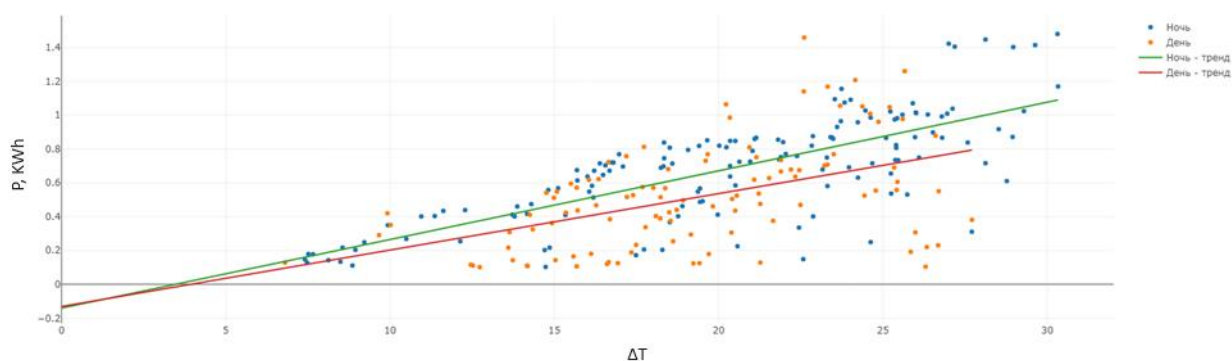


Рисунок 3. Линия тренда

Figure 3. Trend line

На рисунке видно, что графики ночных и дневных данных пересекают 0. Это свидетельствует о наличии некоторого источника тепловой энергии, не учтенного в статистических данных. Таким источником может быть теплый пол. Однако, поскольку обе прямых пересекаются в одной точке, можно говорить о его постоянстве. Прямая ночных измерений имеет больший угол наклона, чем прямая дневных измерений. Это связано с дополнительным источником тепловой энергии, присутствующем только в дневное время – Солнцем, что ведет к снижению необходимой мощности для поддержания заданной разницы температур.

На основании описанного выше, был разработан алгоритм нечеткого управления. Разработанный алгоритм в качестве входных параметров принимает температуры в помещении и на улице. Результатом его работы является значение в диапазоне $[0, 100]$, используемое для управления нагревательным прибором.

Нечеткая переменная «TemperatureOutside» описана с использованием треугольных функций принадлежности и содержит такие термы, как «VeryCold», «Cold», «Chilly», «Moderate», «Warm», «Hot» и «VeryHot». На рисунке 4 приведен график этой переменной.

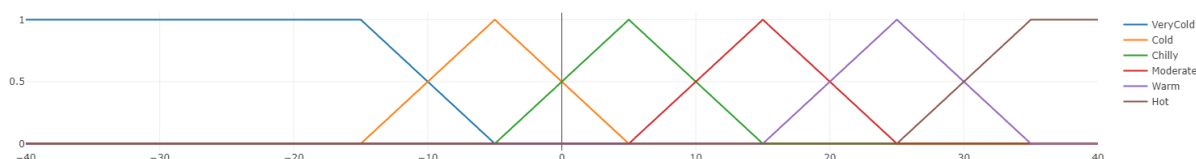


Рисунок 4. TemperatureOutside

Figure 4. TemperatureOutside

Нечеткая переменная «TemperatureInside» также описана с использованием треугольных функций принадлежности

и содержит такие термы, как «VeryCold», «Cold», «Good», «Hot», «VeryHot». На рисунке 5 приведен график этой переменной.

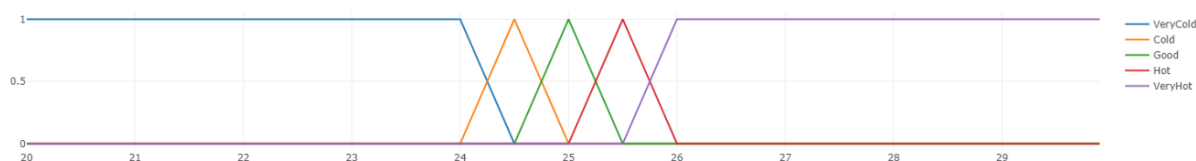


Рисунок 5. TemperatureInside

Figure 5. TemperatureInside

Нечеткая переменная «Power» также описана с использованием треугольных функций принадлежности и содержит такие термы,

как «Min», «Low», «MediumLow», «MediumHigh», «High», «Max». На рисунке 6 приведен график этой переменной.

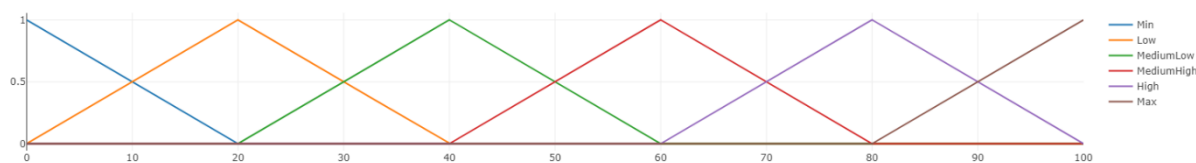


Рисунок 6. Power

Figure 6. Power

Для работы алгоритма управления были разработаны следующие правила:

- IF TemperatureOutside IS VeryCold AND TemperatureInside IS Cold THEN Power IS Max,
- IF TemperatureOutside IS VeryCold AND TemperatureInside IS Good THEN Power IS High,
- IF TemperatureOutside IS VeryCold AND TemperatureInside IS Hot THEN Power IS MediumHigh,

- IF TemperatureOutside IS Cold AND TemperatureInside IS Cold THEN Power IS High,
- IF TemperatureOutside IS Cold AND TemperatureInside IS Good THEN Power IS MediumHigh,
- IF TemperatureOutside IS Cold AND TemperatureInside IS Hot THEN Power IS MediumLow,

- IF TemperatureOutside IS Chilly AND TemperatureInside IS Cold THEN Power IS MediumLow,
- IF TemperatureOutside IS Chilly AND TemperatureInside IS Good THEN Power IS Low,
- IF TemperatureOutside IS Chilly AND TemperatureInside IS Hot THEN Power IS Min,
- IF TemperatureOutside IS Moderate AND TemperatureInside IS Cold THEN Power IS MediumLow,
- IF TemperatureOutside IS Moderate AND TemperatureInside IS Good THEN Power IS Low,
- IF TemperatureOutside IS Moderate AND TemperatureInside IS Hot THEN Power IS Min,
- IF TemperatureOutside IS Warm AND TemperatureInside IS Cold THEN Power IS Low,
- IF TemperatureOutside IS Warm AND TemperatureInside IS Good THEN Power IS Min,

- IF TemperatureOutside IS Warm AND TemperatureInside IS Hot THEN Power IS Min,
- IF TemperatureOutside IS Hot AND TemperatureInside IS Cold THEN Power IS Min,
- IF TemperatureOutside IS Hot AND TemperatureInside IS Good THEN Power IS Min,
- IF TemperatureOutside IS Hot AND TemperatureInside IS Hot THEN Power IS Min,
- IF TemperatureInside IS VeryCold THEN Power IS Max,
- IF TemperatureInside IS VeryHot THEN Power IS Min.

Результатом работы алгоритма является поверхность, приведенная на рисунке 7. По оси X отложена температура в помещении, по Y – температура на улице. Z – значение мощности.

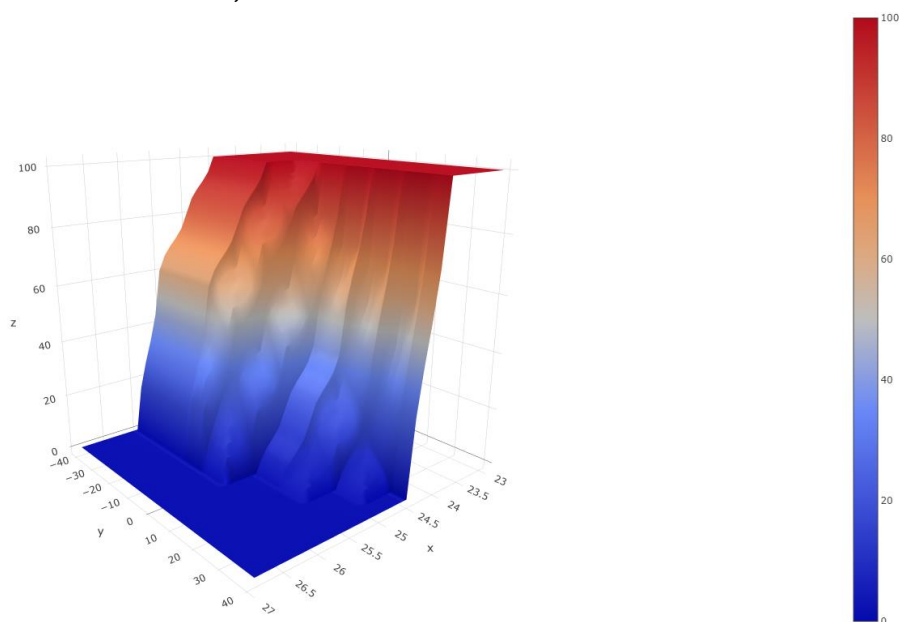


Рисунок 7. Поверхность регулирования

Figure 7. TemperatureOutside

Работа предложенного нечеткого алгоритма управления тестировалась в условиях снижения температуры на улице ночью в летне-осенний период. Целевая температура в помещении («Good») установлена 23.5 градуса.

Изначальная температура в помещении выше установленной.

В ходе снижения температуры в помещении предложенный алгоритм управлял мощностью нагревателя как показано на графике (рисунок 8).



Рисунок 8. График мощности

Figure 8. Power chart

При этом температура в помещении при регулировании оставалась в пределах терма

Good, что видно на графике температуры (рисунок 9).

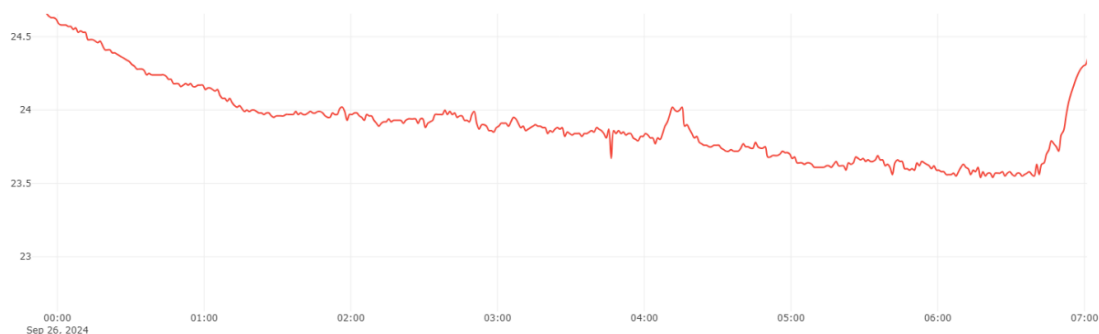


Рисунок 9. График температуры в помещении

Figure 9. Chart of temperature inside

На приведенном примере видно, что предложенный алгоритм способен поддерживать заданную температуру в необходимом диапазоне, хорошо реагируя на изменения температуры как в помещении, так и на улице. При этом не допускает переохлаждения и перегрева и имеет кривую регулирования без резких выбросов.

Выводы

При выполнении данного исследования был проанализирован вид зависимости температуры в помещении от внешних факторов. Было определено, что зависимость имеет линейный вид и в общем случае температура воздуха в помещении зависит от температуры воздуха на улице, если принимать тепловую мощность, выделяемую системой отопления в единицу времени за постоянную величину. Линейный вид функции температуры позволяет, во-первых, не учитывать абсолютное значение температуры в помещении и на улице, а оперировать их разностью. Во-вторых, поможет спрогнозировать количество теплоты, необходимое для поддержания заданной темпе-

ратуры и заранее регулировать систему отопления или охлаждения для поддержания комфортных условий.

Также были проанализированы статистические данные и построена зависимость необходимой выделяемой тепловой мощности системы отопления от разницы температур. Статистические данные были собраны в условиях изменяющейся температуры в помещении. На графиках показано, что мощность, требуемая для поддержания определенной разницы температур, имеет линейный вид, что подтверждает гипотезу и линейном виде зависимости температуры в помещении от различных параметров.

На основании исследования зависимости температуры в помещении от внешних факторов был предложен и опробован нечеткий алгоритм управления мощностью нагревателя. Предложенный тестовый алгоритм показал хорошие параметры регулирования при поддержании заданной температуры в помещении в условиях снижения температуры на улице.

Литература

1. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2012.
2. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности факторов среды обитания для человека. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021.
3. K. Okamoto-Mizuno, K. Mizuno (2012). Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm. *Journal of Sleep Research*, 21(3), 212-218.
4. Кожевникова Н.Ю. Влияние метеорологических условий внутренней среды помещений на здоровье человека // Сборник материалов научно-практической конференции 4 февраля 2010 г. Екатеринбург: - УрГСХА, 2010. Ч. 1 С. 161- 165.
5. "Solar Irradiance Concepts." [Электронный ресурс] // Arka360. - <https://arka360.com/ros/solar-irradiance-concepts/>. - Дата доступа: 12.06.2024.

6. Karjalainen, Sami. (2008). The Characteristics of Usable Room Temperature Control. 978-951-38-7059-1.
7. Fontes, Fernando, Rômulo Antão, Alexandre Mota, and Paulo Pedreiras. 2021. "Improving the Ambient Temperature Control Performance in Smart Homes and Buildings" *Sensors* 21, no. 2: 423. <https://doi.org/10.3390/s21020423>

References

1. GOST 30494-2011. Residential and Public Buildings. Indoor Microclimate Parameters. Moscow: Standardinform, 2012.
2. Sanitary Rules and Norms (SanPiN) 1.2.3685-21. Hygienic Standards and Requirements to Ensure the Safety and/or Harmlessness of Environmental Factors for Humans. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, 2021.
3. K. Okamoto-Mizuno, K. Mizuno (2012). Effects of Thermal Environment on Sleep and Circadian Rhythm. *Journal of Sleep Research*, 21(3), 212-218.
4. Kozhevnikova N. Yu. Influence of Meteorological Conditions of Indoor Environments on Human Health. In Proceedings of the Scientific and Practical Conference, February 4, 2010, Yekaterinburg: Ural State Agrarian University, 2010. Part 1, pp. 161-165.
5. "Solar Irradiance Concepts." [Electronic Resource] // Arka360. - <https://arka360.com/ros/solar-irradiance-concepts/> - Accessed on: 12.06.2024.
6. Karjalainen, Sami (2008). The Characteristics of Usable Room Temperature Control. ISBN 978-951-38-7059-1.
7. Fontes, Fernando, Rômulo Antão, Alexandre Mota, and Paulo Pedreiras. (2021). "Improving the Ambient Temperature Control Performance in Smart Homes and Buildings." *Sensors*, 21(2), 423. <https://doi.org/10.3390/s21020423>.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Донских Дмитрий Павлович	Воронежский государственный университет, ООО «ЭЛ-ЭКС», старший инженер-программист, steamdiver@yandex.ru
Воронцов Ярослав Александрович	кандидат физико-математических наук, Воронежский государственный университет, ООО "Авито Тех", бизнес-партнер по информационной безопасности, Jessy-Black0990@yandex.ru SPIN-код: 4593-1848

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Donskoy Dmitry Pavlovich	Voronezh State University, EL-EX LLC, Senior Software Engineer, steamdiver@yandex.ru
Vorontsov Jaroslav Aleksandrovich	candidate of physico-mathematical sciences, Voronezh State University, Avito Tech LLC, Information Security Business Partner, Jessy-Black0990@yandex.ru SPIN-code: 4593-1848

статья поступила в редакцию 16.12.2024	одобрена после рецензирования 15.01.2025	принята к публикации 27.01.2025
the article was submitted 16.12.2024	approved after reviewing 15.01.2025	accepted for publication 27.01.2025

МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОГО ИНЖИНИРИНГА

Данила Евгеньевич Хныкин[✉]
Людмила Анатольевна Коробова

¹

¹

hnykin.den@yandex.ru
Lyudmila_korobova@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В данной статье представлен опыт реверс-инжиниринга дисплейного модуля, извлеченного из серийно выпускаемого электронного устройства. Описана методология, включающая визуальный осмотр, анализ печатной платы, электрических характеристик, а также результаты, позволившие определить схему подключения и параметры работы дисплея для последующего его применения в собственных проектах. Представленный подход может служить примером для исследователей, инженеров и просто любителей, работающих над интеграцией готовых компонентов в новые системы. Отсутствие доступной технической документации на многие серийно выпускаемые электронные компоненты, такие как дисплейные модули, затрудняет их повторное использование в новых проектах и способствует росту электронных отходов. Это приводит к увеличению затрат на разработку и снижению эффективности использования ресурсов. Применение методологии обратного инжиниринга, включающей визуальный осмотр, анализ печатной платы и определение электрических характеристик, позволяет эффективно восстановить схему подключения и параметры работы дисплейных модулей без использования исходной технической документации, что способствует их повторному использованию и сокращает затраты на разработку новых электронных устройств.

Ключевые слова: реверс-инжиниринг, повторное использование компонентов, дисплейный модуль, электронные отходы, ускоренная разработка, снижение затрат, интеграция компонентов, анализ печатных плат, микроконтроллер, реконструкция схемы, методология исследования, восстановление ресурсов.

Для цитирования: Хныкин Д. Е., Коробова Л. А. Методология и результаты применения обратного инжиниринга // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 30-35.

Original article

METHODOLOGY AND RESULTS OF APPLICATION REVERSE ENGINEERING

Danila E. Khnykin[✉]
Lyudmila A. Korobova

¹

¹

hnykin.den@yandex.ru
Lyudmila_korobova@mail.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. This paper presents the experience of reverse engineering a display module extracted from a commercially available electronic device. The methodology includes visual inspection, printed circuit board analysis, electrical characteristics, and the results that allowed us to determine the connection diagram and operating parameters of the display for its subsequent use in our own projects. The presented approach can serve as an example for researchers, engineers, and hobbyists working on integrating off-the-shelf components into new systems. The lack of available technical documentation for many commercially available electronic components, such as display modules, makes it difficult to reuse them in new projects and contributes to the growth of electronic waste. This leads to increased development costs and decreased resource efficiency. The use of a reverse engineering methodology that includes visual inspection, printed circuit board analysis, and electrical characteristics allows us to effectively restore the connection diagram and operating parameters of display modules without using the original technical documentation, which facilitates their reuse and reduces the costs of developing new electronic devices.

Keywords: reverse engineering, component reuse, display module, electronic waste, accelerated development, cost reduction, component integration, printed circuit board analysis, microcontroller, schematic reconstruction, research methodology, resource recovery.

For citation: Khnykin D. E., Korobova L. A. Methodology and results of application reverse engineering. *Ingenerye tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 30-35. (In Russ.).

Введение

В условиях растущей потребности в ресурсосбережении и ускорении разработки электронных устройств, использование готовых компонентов становится все более востре-

бованным. Отсутствие полной технической документации на многие компоненты, в том числе дисплейные модули, часто препятствует их эффективному применению. Реверс-инжиниринг позволяет преодолеть этот барьер,

предоставляя возможность повторного использования имеющихся компонентов и сокращая затраты на разработку новых устройств. Данная работа актуальна в связи с постоянно увеличивающимся количеством электронных отходов и необходимостью поиска способов их рационального использования [1].

Ресурсосбережение и ускорение разработки электронных устройств – ключевые задачи современной электроники. Использование готовых компонентов, таких как дисплейные модули, позволяет значительно сократить время и затраты на разработку [2]. Однако, отсутствие полной технической документации на эти компоненты часто ставит разработчиков в безвыходное положение, после чего покупается один из множества доступных модулей, на который уже есть подробная документация, а другие разработчики уже обсудили на интернет-форумах проблемы при работе с ним. Но все же, всегда остается более сложный, но очень увлекательный процесс – проведение реверс-инжиниринга. В данной работе демонстрируется успешное применение методов реверс-инжиниринга к дисплейному модулю из остатков устройства, которое не удалось идентифицировать [3].

Материалы и методы исследования

Процесс реверс-инжиниринга [4] в данном случае включает в себя следующие этапы:

1. Внешний осмотр и идентификация анализируемого модуля.
2. Картография печатной платы.
3. Идентификация управляющего контролера.
4. Восстановление схемы и интерфейса.
5. Тестирование и подтверждение.

Рассмотрим каждый этап более подробно.

Этап 1. Внешний осмотр и идентификация модуля. Проводится идентификация маркировки компонентов и интерфейсных разъемов. Фотографирование и документирование ключевых элементов сыграли определяющую роль в последующем анализе. Используя мультиметр и камеру телефона с многократным зумом, был проведён анализ печатной платы электронного модуля, т.е. получили информацию о дисплейном модуле, припаянном к плате. Производим поиск маркировки на самой плате или дисплее, далее необходимо найти документацию на конкретный модуль или сразу, описанные случаи использования этого модуля другими людьми. В данном случае на плате присутствовал лишь обозначенный порядковый номер компонента дисплейного модуля, и присутствовала информация на самом модуле, которая говорит только

о типе дисплея и имеет надпись: smmd5480 (рисунок 1).

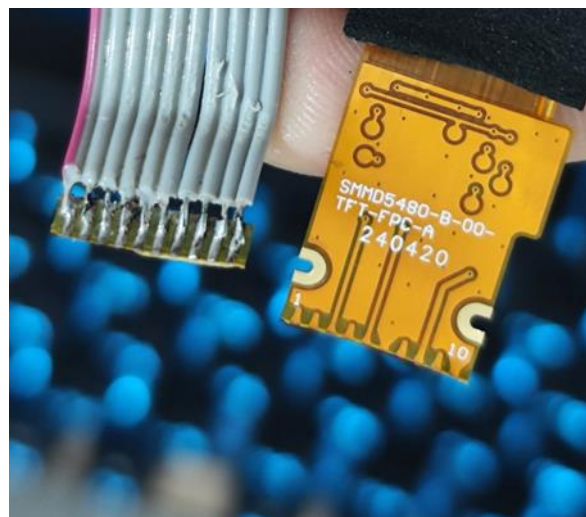


Рисунок 1. Пример идентификации анализируемого модуля

Figure 1. Example of identification of the analyzed module

Поиск в интернете не принес необходимой информации, не удалось найти ни документацию, ни описания опыта использования устройства с такой маркировкой.

Этап 2. Картография печатной платы. Целью этапа является: определение структуры печатной платы, трассировки дорожек, выявление ключевых элементов (рисунок 2).



Рисунок 2. Пример анализируемой печатной платы (фрагмент)

Figure 2. Example of the analyzed printed circuit board (fragment)

Промежуточные итоги исследования печатной платы были следующие:

- определены линии питания и земля;
- у некоторых компонентов на плате, к которым шло питание, дорожки линий были шире, чем у других компонентов;
- обнаружен «главный компонент» - управляющий микроконтроллер — это примитивное устройство, размером больше, чем остальные компоненты, от него идёт больше всего дорожек к вспомогательным компонентам на плате.

Этап 3. Идентификация управляющего контроллера. На этом этапе необходимо определить основной микроконтроллер или микропроцессор, управляющего дисплеем [5, 6]. С помощью многократного зума на камере смартфона и вспышки, удалось прочесть маркировку микроконтроллера: PUYA F030K28 (рисунок 2). В интернете удалось найти документацию на этот микроконтроллер, но на китайском языке. Это 32-разрядный ARM процессор с Arm® Cortex®-M0+ ядром.

Этап 4. Восстановление схемы и интерфейса. Были определены сигнальные линии, линии питания, земля и управляющие сигналы. Схема подключения была восстановлена путем тщательного прослеживания дорожек печатной платы и совмещения этого с просмотром документации на управляющий контроллер [7, 8]. Особое внимание было уделено определению типа используемого интерфейса.

В результате реверс-инжиниринга была полностью восстановлена схема подключения дисплейного модуля (рисунок 3). Определено, что дисплей использует интерфейс SPI и питается от напряжения 3.3 В. Были идентифицированы все сигнальные контакты, включая контакты линий передачи данных (MISO и MOSI), контакт передачи сигналов синхронизации (SCK), контакт DC (data/command), который отвечает за выбор типа записываемого в модуль слова — данные или команда [9, 10].

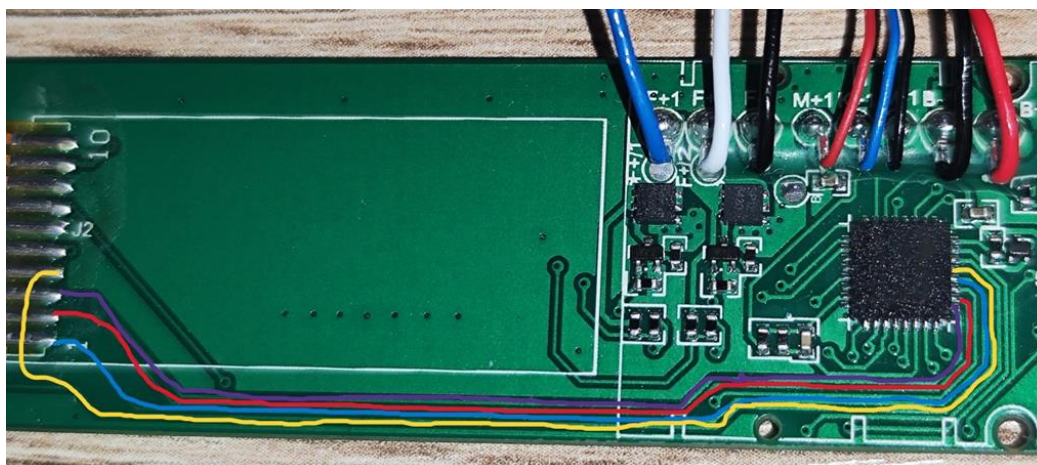


Рисунок 3. Восстановление схемы и интерфейса

Figure 3. Restoring the circuit and interface

Этап 5. Тестирование и подтверждение. Этап проверки правильности восстановленной схемы и параметров работы дисплея [11, 12]. Для этого к отпаянному модулю был припаян соединительный шлейф из многожильных проводов (рисунок 4), т.к. сам шлейф дисплея очень гибкий и его можно легко повредить в процессе работы, его после пайки необходимо жестко зафиксировать. Дисплейный модуль для тестов был подключён к микропроцессору ESP32.

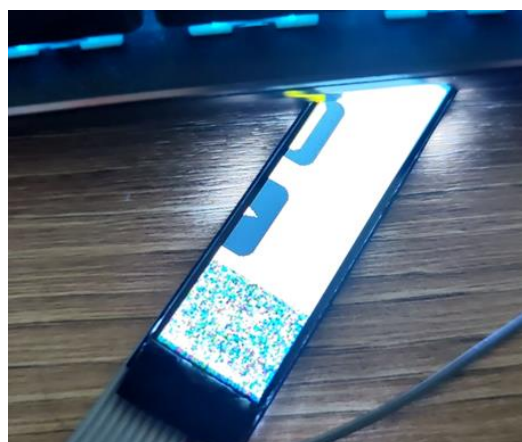


Рисунок 4. Шлейф дисплея

Figure 4. Display cable

Результаты исследования и их обсуждение

Для тестов использовались примеры из библиотеки Adafruit_ST7789. С помощью этих тестовых примеров и была проведена проверка отображения данных, работы подсветки и других функций дисплея (рисунок 5).



Рисунок 5. Тестовый пример работы восстановленного дисплейного модуля

Figure 5. Test example of the restored display module operation

Предложенный подход к реверс-инжинирингу показал свою эффективность, которая заключается в: достижении поставленных целей по восстановлению функциональности дисплейного модуля путем тщательного анализа печатной платы, на которую он был установлен и электрических характеристик, несмотря на отсутствие исходной документации. Это позволило определить необходимые параметры для его подключения и использования, а также избежать затрат на приобретение нового аналогичного компонента, способствуя более рациональному использованию имеющихся ресурсов и ускорению про-

цесса разработки. Работы автора Израилова К.Е., также подтверждают сделанные выводы. Израилов К.Е. проводил исследования и систематизировал их начиная от подготовки объекта исследования до проведения непосредственно самих динамических и статистических исследований.

Полученные данные позволили не только использовать дисплейный модуль в новых проектах, но и получить ценную информацию о его архитектуре и функционировании. Реверс-инжиниринг – трудоёмкий процесс, требующий высокой квалификации и специализированного оборудования. Кроме того, существует риск повреждения исследуемого целевого модуля в процессе анализа.

Заключение

В данной работе представлено применение методов реверс-инжиниринга к дисплейному модулю из неизвестного электронного устройства. Подробное описание методологии и полученных результатов может быть полезно для других исследователей, инженеров, любителей, работающих над подобными задачами. Дальнейшие исследования будут направлены на автоматизацию процесса реверс-инжиниринга, разработку документального оформления и создание описания баз данных характеристик готовых компонентов.

Литература

1. Системы промышленной автоматизации : учебное пособие / А. И. Сергеев, А. М. Черноусова, А. С. Русяев, В. В. Тугов. — Оренбург: ОГУ, 2017. — 106 с.
2. Коробова, Л. А. Программно-техническое средство диагностики АСУТП: контроль данных и управление состоянием системы автоматизации / Л. А. Коробова, И. С. Толстова, И. М. Харитонов // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2022. – № 3(29). – С. 5-10. – EDN RPEOOG.
3. Организационно-технологическая система энергообеспечения и энергопотребления (ОТС "ЭНЕРГИЯ") / Л. А. Коробова, К. Н. Матусов, О. А. Гордиенко, И. С. Кутявин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2013. – № 3(57). – С. 76-81. – EDN RGSRHJ.
4. Обратный инжиниринг — что это простыми словами. Промцифра [Электронный ресурс]: - URL: <https://promzyfra.ru/> (дата обращения 05.01.2025)
5. Водолазов, А. Микроконтроллеры для систем автоматики. Учебное пособие / А. Водолазов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 168 с.
6. Сбродов, Н. Б. Программируемые контроллеры и микроконтроллеры в системах автоматизации: учебное пособие / Н. Б. Сбродов, Е. К. Карпов. — Курган: КГУ, 2019. — 110 с.
7. Петин, В. Новые возможности Arduino, ESP, Raspberry Pi в проектах IoT / В. Петин. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. – 319 с.
8. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров; под редакцией В. П. Дьяконова. — Москва: СОЛОН-Пресс, 2004. — 256 с.

9. Касперски К. Искусство дизассемблирования / К. Касперски. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. – 884 с.
10. Ревнивых А.В., Велижанин А.С. Методика автоматизированного формирования структуры дизассемблированного листинга // Кибернетика и программирование. 2019. № 2. С. 1–16. DOI:10.25136/2306-4196.2019.2.28272. EDN:TGCZKJ
11. Токарев, Ю. Ю. Одна из особенностей перехода на отечественное программное обеспечение / Ю. Ю. Токарев, Л. А. Коробова // XXV студенческая научно-исследовательская конференция: Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции с международным участием – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2024. – С. 66-72. – EDN REIKOT.
12. Рубанова К.А. Стратегии применения обратного инжиниринга в условиях цифровой трансформации экономики // Human Progress. 2022. Том 9, Вып. 1. С. 13. URL: http://progresshuman.com/images/2023/Том9_1/Rubanova.pdf. DOI 10.34709/IM.191.13. EDN AKEOLL.
13. Израилов К.Е. Методология проведения реверс-инжиниринга машинного кода. Часть 3. Динамическое исследование и документирование // Труды учебных заведений связи. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-provedeniya-revers-inzhiniringa-mashinnogo-koda-chast-3-dinamicheskoe-issledovanie-i-dokumentirovanie> (дата обращения: 05.01.2025).
14. Израилов К.Е. Методология реверс-инжиниринга машинного кода. Часть 2. Статическое исследование. Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9 № 6. С. 68-82. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-6-68-82.
15. Израилов К.Е. Методология проведения реверс-инжиниринга машинного кода. Часть 1. Подготовка объекта исследования // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 5. С. 79-90. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-79-90. EDN:ZXLTBА

References

1. Industrial automation systems : a textbook / A. I. Sergeev, A.M. Chernousova, A. S. Rusyaev, V. V. Tugov. Orenburg: OSU, 2017. 106 p.
2. Korobova L. A., Tolstova I. S., Kharitonov I. M. Software and hardware diagnostics of automated control systems: data monitoring and control of the automation system / L. A. Korobova, I. S. Tolstova, I. M. Kharitonov // Information technologies in construction, social and economic systems. – 2022. – № 3(29). – Pp. 5-10. – EDN RPEOOG.
3. Organizational and technological system of energy supply and energy consumption (OTS ENER-GIA) / L. A. Korobova, K. N. Matusov, O. A. Gordienko, I. S. Kutyavin // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2013. – № 3(57). – Pp. 76-81. – EDN RGSRHJ.
4. Reverse engineering — what is it in simple terms. Promcifra [Electronic resource]: - URL: <https://promzyfra.ru/> (accessed 05.01.2025)
5. Vodolazov, A. Microcontrollers for automation systems. Textbook / A. Vodolazov. Vologda: Infra-Engineering, 2022. 168 p.
6. Rabrodov, N. B. Programmable controllers and microcontrollers in automation systems: a textbook / N. B. Rabrodov, E. K. Karpov. Kurgan: KSU, 2019. 110 p.
7. Petin, V. New features of Arduino, ESP, Raspberry Pi in IoT projects / V. Petin. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2022. – 319 p.
8. Petrov, I. V. Programmable controllers. Standard languages and techniques of applied design / I. V. Petrov; edited by V. P. Dyakonov. Moscow: SOLON Press, 2004. 256 p.
9. Kaspersky K. The art of disassembling / K. Kaspersky. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2007. – 884 p.
10. Revnivikh A.V., Velizhanin A.S. Methodology of automated formation of the structure of a disassembled listing // Cybernetics and programming. 2019. No. 2. pp. 1-16. DOI:10.25136/2306-4196.2019.2.28272. EDN:TGCZKJ
11. Tokarev, Yu. Y. One of the features of the transition to domestic software / Yu. Y. Tokarev, L. A. Korobova // XXV Student Research Conference: Proceedings of the All-Russian Research Conference with international participation – Voronezh: Publishing HousePolygraphic center "Scientific Book", 2024. – pp. 66-72. – EDN REIKOT.
12. Rubanova K.A. Strategies for applying reverse engineering in the context of digital transformation of the economy // Human Progress. 2022. Volume 9, Issue 1. P. 13. URL: http://progresshuman.com/images/2023/Том9_1/Rubanova.pdf . DOI 10.34709/IM.191.13. EDN AKEOLL.

13. Izrailov K.E. Methodology of reverse engineering of machine code. Part 3. Dynamic research and documentation // Proceedings of educational institutions of communication. 2024. No. 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-provedeniya-revers-inzhiniringa-mashinnogo-koda-chast-3-dinamicheskoe-issledovanie-i-dokumentirovanie> (date of request: 05.01.2025).

14. Izrailov K.E. Methodology of reverse engineering of machine code. Part 2. Static research. Proceedings of educational institutions of communications. 2023. Vol. 9 No. 6. pp. 68-82. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-6-68-82.

15. Izrailov K.E. Methodology of reverse engineering of machine code. Part 1. Preparation of the research object // Proceedings of educational institutions of communications. 2023. Vol. 9. No. 5. pp. 79-90. DOI: 10.31854/1813-324X-2023-9-5-79-90. EDN: ZXLTBА

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Хныкин Данила Евгеньевич	студент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистрант кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, hnykin.den@yandex.ru
Коробова Людмила Анатольевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Khnykin Danila Evgenievich	student, Voronezh State University of Engineering Technologies, master's student of the department of information technology, modeling and management, hnykin.den@yandex.ru
Korobova Lyudmila Anatolyevna	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the Department of information technology, modeling and management, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X

статья поступила в редакцию 05.01.2025	одобрена после рецензирования 21.01.2025	принята к публикации 04.02.2025
the article was submitted 05.01.2025	approved after reviewing 21.01.2025	accepted for publication 04.02.2025

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ JAVA ФРЕЙМВОРКОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МИКРОСЕРВИСОВ

Павел Игоревич Поздняков rz_pasha@mail.ru

МИРЭА – Российский технологический университет, пр-кт Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ популярных Java фреймворков для разработки микросервисов, таких как Spring Boot, Quarkus, Micronaut и Dropwizard. Рассматриваются функциональные возможности каждого фреймворка, включая производительность, простоту использования, поддержку и экосистему. Анализируется их применимость в контексте разработки микросервисных приложений, а также выявляются ключевые особенности, которые влияют на выбор фреймворка в зависимости от типа проекта. А также проводится сравнение рассматриваемых фреймворков с точки зрения их тестируемости и масштабируемости. Исследуются перспективы развития данных фреймворков, а также их роль в дальнейшем развитии микросервисной архитектуры.

Ключевые слова: микросервисы, java, spring Boot, quarkus, micronaut, dropwizard, производительность, простота использования, тестируемость, экосистема, разработка.

Для цитирования: Поздняков П. И. Сравнительный анализ JAVA фреймворков для разработки микросервисов // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 36-41.

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF JAVA FRAMEWORKS FOR MICROSERVICES DEVELOPMENT

Pavel I. Pozdniakov rz_pasha@mail.ru

MIREA – Russian Technological University, Vernadsky Avenue, 78, Moscow, 119454, Russia

Abstract. This article provides a comparative analysis of popular Java frameworks for microservices development, such as Spring Boot, Quarkus, Micronaut, and Dropwizard. The functional capabilities of each framework are examined, including performance, ease of use, support, and ecosystem. Their applicability in the context of microservice application development is analyzed, and the key features influencing the choice of a framework depending on the project type are identified. Additionally, the frameworks are compared in terms of their testability and scalability. The study explores the prospects for the development of these frameworks and their role in the future advancement of microservices architecture.

Keywords: microservices, Java, Spring Boot, Quarkus, Micronaut, Dropwizard, performance, ease of use, testability, ecosystem, development.

For citation: Pozdniakov P. I. Comparative analysis of JAVA frameworks for microservices development. Inženerye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 36-41. (In Russ.).

Введение

В последние годы микросервисная архитектура набирает популярность благодаря своей способности улучшать масштабируемость, гибкость и поддержку непрерывной доставки приложений. В рамках этой архитектуры приложения разделяются на независимые сервисы, которые могут работать, обновляться и масштабироваться независимо друг от друга [1]. Важно выбрать подходящий фреймворк для создания микросервисов, который обеспечит эффективное взаимодействие сервисов и их поддержку. В этой статье рассматриваются четыре наиболее популярных Java фреймворка

для разработки микросервисов: Spring Boot, Quarkus, Micronaut и Dropwizard.

Одной из главных причин популярности микросервисов является их способность поддерживать непрерывную доставку и разработку. В отличие от монолитных систем, где все изменения вносятся в одну большую кодовую базу, микросервисы позволяют командам работать над различными компонентами приложения одновременно, сокращая время разработки и ускоряя процесс вывода новых версий на рынок. Каждый сервис может обновляться независимо от других, что сводит к минимуму риски для работы всей системы в целом. Это особенно важно в современных условиях, когда время

отклика на изменения рынка или запросы пользователей имеет решающее значение.

Преимущества Java в микросервисной архитектуре

Java является одним из лучших выборов для разработки микросервисов благодаря своей платформенной независимости, богатой экосистеме и высокой производительности. Использование виртуальной машины JVM позволяет запускать приложения на любых устройствах и операционных системах, что особенно важно для распределенных микросервисных архитектур.

Наличие таких мощных инструментов, как Spring Boot, Quarkus, Micronaut и Dropwizard, ускоряет процесс разработки, упрощает тестирование и развертывание, давая разработчикам возможность сосредоточиться на решении бизнес-задач. Поддержка многопоточности и асинхронной обработки делает Java-приложения масштабируемыми и способными обрабатывать значительные нагрузки, что особенно важно для динамичных систем.

Производительность современных версий JVM конкурирует с языками низкого уровня, что обеспечивает минимальное время отклика и высокую скорость работы приложе-

ний. Встроенные механизмы безопасности, такие как защита от SQL-инъекций, управление доступом и поддержка SSL/TLS, обеспечивают надежность и защиту данных, что критически важно для микросервисов, работающих в распределенных сетях.

Актуальность языка подтверждается поддержкой крупных корпораций, таких как Oracle, и активным сообществом, которое гарантирует доступность документации и решений для разработчиков любого уровня. Интеграция Java с облачными технологиями, такими как Docker и Kubernetes, позволяет создавать и разворачивать микросервисы в современных облачных средах, обеспечивая гибкость и надежность. Таким образом, Java благодаря своей универсальности, производительности и безопасности представляет собой идеальную основу для разработки современных микросервисных систем, отвечающих высоким требованиям к масштабируемости и устойчивости [2].

Согласно рисунку 1 язык Java имеет большой выбор фреймворков, для разработки микросервисов, что делает его одним из самых востребованных в этой сфере [3].

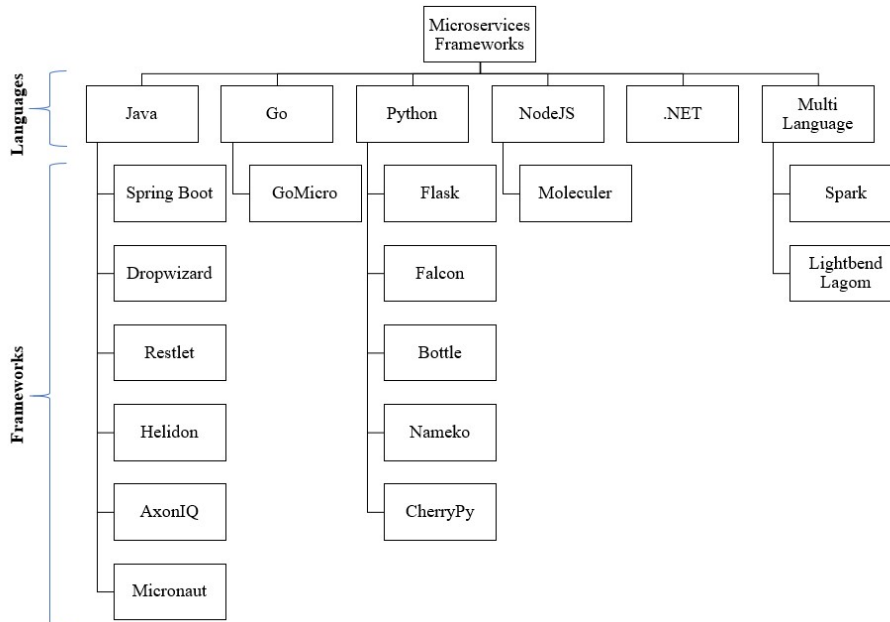


Рисунок 1. Классификация фреймворков для микросервисов по языкам программирования

Figure 1. Classification of Microservice Frameworks by Programming Languages

Сравнительный анализ

Spring Boot — один из самых популярных фреймворков для создания микросервисных приложений на платформе Java. Его об-

ширная экосистема и поддержка широкого спектра библиотек позволяют быстро разрабатывать даже самые сложные системы. Особенностью Spring Boot является упрощённая конфигурация и удобное управление зави-

симостями, что делает его идеальным выбором для крупных корпоративных проектов. Разработчики ценят его за высококачественную документацию и активное сообщество, которое предоставляет решения практически для любых задач. Кроме того, интеграция с такими инструментами, как Docker и Kubernetes, обеспечивает лёгкость развертывания и масштабирования приложений.

Фреймворк поддерживает современные архитектурные подходы, такие как микросервисы, архитектура на основе событий и использование шлюзов. Однако широкие возможности Spring Boot сопровождаются высоким уровнем накладных расходов: приложения на этом фреймворке потребляют больше ресурсов, чем на других решениях, а сложность настройки и обслуживания крупных систем может увеличивать время разработки и требования к инфраструктуре [4].

Так же Spring предоставляет множество дополнительных ресурсов и инструментов таких как:

1. Spring Cloud — это набор инструментов, созданных для работы с распределёнными системами.

2. Spring Security предоставляет инструменты для аутентификации и авторизации. Он позволяет легко интегрировать OAuth 2.0 и OpenID Connect для обеспечения безопасности микросервисов, а также использовать токены JWT (JSON Web Tokens).

3. Spring Data упрощает взаимодействие с базами данных. Благодаря поддержке множества реляционных и NoSQL баз, таких как PostgreSQL, MongoDB, Cassandra и Redis, можно легко интегрировать базы данных в микросервисы.

4. Spring Boot Actuator предоставляет метрики, информацию о состоянии и мониторинг микросервисов. Есть возможность отслеживать производительность и состояние сервисов, а также интегрировать их с системами мониторинга, такими как Prometheus или Grafana.

5. Для обработки больших объёмов данных в микросервисах можно использовать Spring Batch. Он предоставляет инструменты для обработки данных, включая чтение, преобразование и запись, а также управление задачами и обработку ошибок.

Quarkus ориентирован на разработку современных приложений, оптимизированных для работы в облачных средах и в сценариях serverless. Основной упор сделан на производительность: благодаря интеграции с GraalVM

приложения на Quarkus могут компилироваться в нативный код, что значительно сокращает время запуска и потребление ресурсов. Это делает его особенно актуальным для высоконагруженных систем и сервисов, где важна скорость реакции и минимизация затрат. Quarkus предоставляет удобные инструменты для интеграции с Kubernetes и облачными платформами, включая автоматическую генерацию YAML-конфигураций для Kubernetes. Несмотря на свои сильные стороны, Quarkus остаётся сравнительно новым фреймворком, что может создавать трудности при поиске документации или готовых решений для специфических задач. Кроме того, разработчики, ранее не работавшие с GraalVM, могут столкнуться с необходимостью изучения дополнительных инструментов [5].

Одной из ключевых особенностей Quarkus является его поддержка реактивного программирования и микросервисной архитектуры, что позволяет создавать высокоскоростные, асинхронные приложения, которые могут эффективно обрабатывать большое количество одновременных запросов. Quarkus интегрируется с такими технологиями, как Hibernate, JAX-RS и MicroProfile, что облегчает разработку и ускоряет внедрение новых фич. Также стоит отметить, что Quarkus имеет встроенную поддержку тестирования, что упрощает процесс обеспечения качества на всех этапах разработки. Несмотря на это, в связи с его сравнительной новизной, сообщество Quarkus пока не так активно, как у более старых фреймворков, таких как Spring Boot, и это может быть фактором, сдерживающим его широкое принятие в некоторых корпоративных проектах.

Micronaut представляет собой современное решение, ориентированное на минимизацию накладных расходов и повышение производительности приложений. Его архитектура, основанная на предварительной компиляции метаданных, обеспечивает быстрый запуск и экономное использование памяти. Это делает его отличным выбором для микросервисов, которые работают в условиях ограниченных ресурсов.

Micronaut поддерживает компиляцию в нативный код через GraalVM, что делает его особенно актуальным для приложений, работающих в облачных средах [6]. Ещё одной сильной стороной фреймворка является его гибкость: разработчики могут легко интегрировать его с такими инструментами, как Docker, Kubernetes и популярные базы данных.

Тем не менее, по сравнению с Spring Boot, экосистема Micronaut всё ещё развивается, а количество доступных библиотек и готовых решений остаётся ограниченным, что может потребовать дополнительных усилий при решении нестандартных задач.

Micronaut также предлагает продвинутую поддержку для работы с реактивными приложениями, что позволяет разрабатывать высокоскоростные, асинхронные сервисы. Благодаря встроенной поддержке Dependency Injection и аспектно-ориентированного программирования, фреймворк предоставляет мощные возможности для создания гибкой и модульной архитектуры. Кроме того, Micronaut предоставляет простой и понятный API для работы с сервисами, а также поддержку тестирования на всех уровнях приложения, что облегчает процесс разработки и упрощает поддержку кода в долгосрочной перспективе. Несмотря на некоторые ограничения по сравнению с более зрелыми фреймворками, такими как Spring Boot, Micronaut является перспективным выбором для тех, кто ищет решение с высокой производительностью и низким временем отклика.

Dropwizard фокусируется на простоте использования и эффективности. Этот фреймворк предназначен для быстрого создания RESTful веб-сервисов, что делает его отличным выбором для небольших и средних проектов, где скорость разработки имеет первостепенное значение. Dropwizard включает в себя множество популярных библиотек, таких как Jetty, Jackson и Metrics, что позволяет разрабатывать приложения без необходимости выбора и интеграции отдельных компонентов. Одним из ключевых преимуществ Dropwizard является

его встроенная поддержка инструментов для мониторинга и управления, что упрощает эксплуатацию и поддержку сервисов. Однако ограниченная экосистема и отсутствие активного развития делают этот фреймворк менее подходящим для сложных и масштабируемых систем. В сравнении с другими решениями, такими как Quarkus и Micronaut, Dropwizard уступает в гибкости и производительности [7].

Итоги анализа

проведённый анализ четырёх популярных Java-фреймворков для разработки микросервисов – Spring Boot, Quarkus, Micronaut и Dropwizard – показал, что каждый из них обладает уникальными особенностями и применяется в зависимости от конкретных задач. Spring Boot остаётся наиболее востребованным на практике благодаря зрелой экосистеме, широкому сообществу, поддержке корпоративного уровня и интеграции с популярными облачными платформами. Это делает его универсальным решением для большинства крупных корпоративных приложений. Quarkus и Micronaut демонстрируют преимущества в сценариях, где важны высокая производительность, минимальное потребление ресурсов и быстрое время запуска, что делает их особенно актуальными для облачных решений. Так же данные ресурсы имеют хорошие перспективы для развития. Dropwizard, в свою очередь, ориентирован на стабильность и простоту, что делает его подходящим выбором для небольших проектов с минимальными требованиями к сложности.

Согласно исследованиям [8] Spring Boot является самым популярным фреймворком на рынке на 2021 год, на рисунке 2 предоставлена данная статистика.

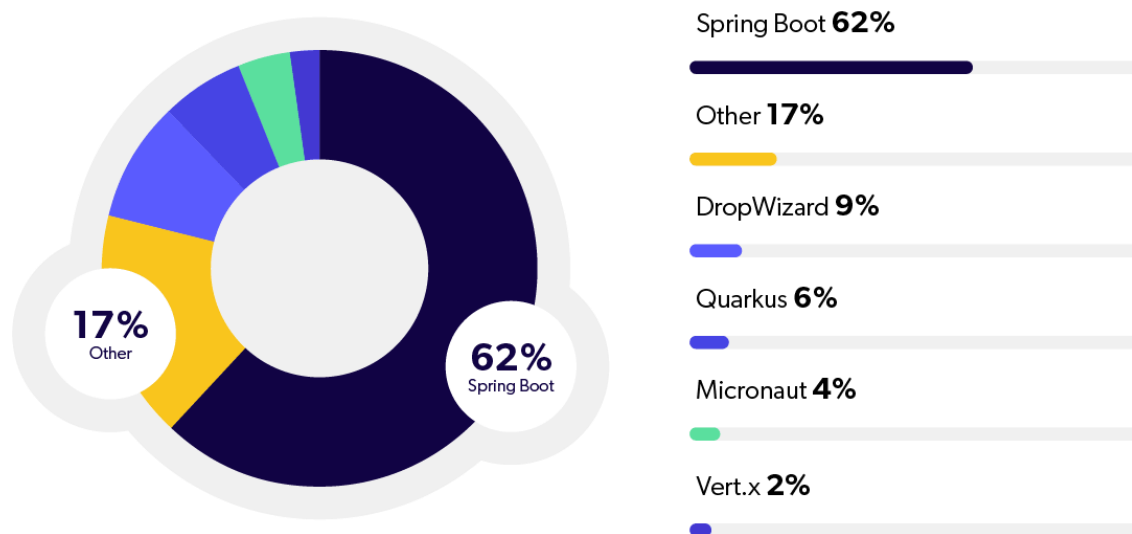


Рисунок 2. Динамика использования Java фреймворков в 2021 году

Figure 2. Dynamics of Java Framework Usage in 2021

На сегодняшний день Spring Boot остается фаворитом в разработке микросервисов благодаря своей простоте и надежности. Его популярность обусловлена не только зрелостью экосистемы, но и философией «конвенция важнее конфигурации», которая позволяет разработчикам сосредоточиться на бизнес-логике, а не на настройке. Интеграция с DevOps-практиками, автоматизация развертывания и активное развитие сообщества делают его не просто инструментом, а эталоном удобства и эффективности в разработке микросервисных приложений.

Выводы

В результате сравнительного анализа Spring Boot, Quarkus, Micronaut и Dropwizard можно сделать вывод, что каждый из фреймворков имеет свои сильные стороны. Spring Boot остается основным выбором для большинства разработчиков благодаря своей зрелости и богатой экосистеме, однако его производительность может ограничивать использование в некоторых сценариях. В то время как Quarkus и Micronaut предлагают более современные и легкие решения, оптимизированные для облачных вычислений и контейнерных

технологий, с явными преимуществами в производительности и времени запуска.

Тем не менее, при выборе фреймворка для разработки микросервисов важно учитывать не только производительность, но и другие аспекты, такие как поддержка экосистемы, гибкость в интеграциях, а также специфику работы с облачными платформами. Каждый из рассмотренных фреймворков имеет свои особенности, которые могут подходить для различных типов приложений и команд разработки. Например, Quarkus и Micronaut могут стать идеальными решениями для современных распределенных систем, в то время как Dropwizard будет предпочтительным выбором для легких и простых приложений.

Будущее микросервисной архитектуры на основе Java видится в сочетании зрелых инструментов, таких как Spring Boot, с более инновационными решениями, что открывает разработчикам новые горизонты для создания масштабируемых, производительных и гибких приложений. Этот подход позволит оптимально использовать сильные стороны каждого фреймворка, обеспечивая высокую производительность и адаптивность современных микросервисов.

Литература

1. Ньюмен С. Создание микросервисов: проектирование, внедрение и сопровождение / пер. с англ. А. Полянского. — М.: Издательство «Манн, Иванов и Фербер», 2016. — 300 с.
2. Блох, Дж. Java. Эффективное программирование. — 3-е изд. — М.: Диалектика, 2018. — 416 с.
3. Лучшие фреймворки для микросервисов // [Электронный ресурс] // Habr. Url: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/563884/> (Дата обращения 15.11.2024).
4. с.Карнелл Д., Санчес И. У. Микросервисы Spring в действии / пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2022. — 420 с.
5. Сото, А., Портер, Дж., Саттер, Б. Quarkus: Ввод в эксплуатацию: Разработка Java микросервисов с использованием Kubernetes и GraalVM. — О'Рейли, 2021. — 320 с.
6. Micronaut. Краткое руководство о том, как создавать микросервисы // [Электронный ресурс] // tune-it. Url: <https://www.tune-it.ru/web/romo/blog/-/blogs/micronaut-microservices-part1> (Дата обращения 17.11.2024).
7. Создание микросервисов на Java с Dropwizard // [Электронный ресурс] // Habr. Url: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/836042/> (Дата обращения 18.11.2024).
8. Отчет по технологиям Java // [Электронный ресурс] // Jrebel. Url: <https://www.jrebel.com/blog/2021-java-technology-report> (Дата обращения 18.11.2024).

References

1. Newman, S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. Translated from English by A. Polyansky. Moscow: Mann, Ivanov, and Ferber Publishing, 2016. 300 p.
2. Bloch, J. Effective Java. 3rd edition. Moscow: Dialectics, 2018. 416 p.
3. The Best Frameworks for Microservices [Electronic resource] // Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/563884/> (Accessed on 15.11.2024).

4. Carnell, D., Sanchez, I. U. Spring Microservices in Action. Translated from English. Moscow: DMK Press, 2022. 420 p.
5. Soto, A., Porter, J., Sutter, B. Quarkus: Getting Started: Developing Java Microservices with Kubernetes and GraalVM. O'Reilly, 2021. 320 p.
6. Micronaut: A Brief Guide to Building Microservices [Electronic resource] // tune-it. URL: <https://www.tune-it.ru/web/romo/blog/-/blogs/micronaut-microservices-part1> (Accessed on 17.11.2024).
7. Building Microservices in Java with Dropwizard [Electronic resource] // Habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/otus/articles/836042/> (Accessed on 18.11.2024).
8. Java Technology Report [Electronic resource] // JRebel. URL: <https://www.jrebel.com/blog/2021-java-technology-report> (Accessed on 18.11.2024).

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Поздняков Павел Игоревич	студент, Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), магистрант кафедры Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, rz_pasha@mail.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Pozdniakov Pavel Igorevich	student, Federal state budgetary educational institution of higher education "MIREA – Russian Technological University" (RTU MIREA), master's student of the department of Mathematical support and standardization of information technologies, rz_pasha@mail.ru

статья поступила в редакцию 08.01.2025	одобрена после рецензирования 22.01.2025	принята к публикации 06.02.2025
the article was submitted 08.01.2025	approved after reviewing 22.01.2025	accepted for publication 06.02.2025

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОТОКОЛА SSH

Юрий Алексеевич Воронцов[✉] ¹ voroncov_yu@mirea.ru
Евгения Константиновна Михайлова ¹ mihajlova_e@mirea.ru

¹МИРЭА — Российский технологический университет, пр-кт Вернадского, дом 78, г. Москва, 119454, Россия

Аннотация. Решения, построенные на основе концепции интернета вещей, стали неотъемлемой частью большого количества областей человеческой деятельности. Любое подобное решение имеет типовую архитектуру программного обеспечения (ПО) для сбора, хранения, обработки и предоставления данных конечному пользователю. При этом ПО имеет необходимость в постоянном обновлении, и сложнее всего реализовать обновления на уровне IoT-устройств. При условии поддержки устройством протокола SSH можно прибегнуть к использованию инструментов управления конфигурацией для автоматизации процесса настройки и реализации системы управления устройствами. В случае установки ОС на базе ядра Linux на IoT-устройство реализовать подобный подход можно ещё проще и эффективнее. В результате можно получить значительное сокращение временных затрат, необходимых на настройку большого количества устройств. Дополнительное преимущество можно получить в случае реализации веб-интерфейса поверх системы управления конфигурацией. Однако, системы управления конфигурацией приносят так же и накладные расходы при применении конфигурации на устройстве, что не дает серьезного преимущества при настройке устройства с точки зрения времени применения требуемой конфигурации. Исходя из этого для повышения эффективности работы системы управления следует использовать непосредственно протокол SSH для удаленного выполнения команд на конечном устройстве, а также протокол SFTP для отправки необходимых файлов конфигурации. Такой подход позволяет получить значительное уменьшение времени конфигурирования устройства. В статье представлены обе реализации системы управления устройствами интернета вещей, а также проведен сравнительный анализ результатов их применения.

Ключевые слова: интернет вещей, система управления конфигурацией, устройства интернета вещей, Linux IoT, протокол SSH.

Для цитирования: Воронцов Ю. А., Михайлова Е. К. Система управления устройствами интернета вещей с применением протокола SSH // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 42-51.

Original article

INTERNET OF THINGS DEVICE MANAGEMENT SYSTEM USING SSH PROTOCOL

Yuriy A. Vorontsov[✉] ¹ voroncov_yu@mirea.ru
Evgenia K. Mikhailova ¹ mihajlova_e@mirea.ru

¹MIREA – Russian Technological University, Vernadsky Avenue, 78, Moscow, 119454, Russia

Abstract. Solutions based on the Internet of Things (IoT) concept have become an integral part of numerous domains of human activity. Any such solution has a typical software architecture for collecting, storing, processing and providing data to the end user. At the same time, the software needs to be constantly updated, and it is most difficult to implement updates at the IoT device level. If a device supports the SSH protocol, configuration management tools can be used to automate the setup process and implement a device management system. In situation when IoT device use a Linux kernel-based operating system, this approach can be executed more easily and efficiently. As a result, there can be significant time savings in configuring a large number of devices. An additional benefit can be achieved by implementing a web interface on top of the configuration management system. However, applying configurations on devices with configuration management systems also introduce overhead, which diminishes the time advantage for configuring individual devices. Therefore, to improve the efficiency of the management system, it is recommended to use the SSH protocol directly for executing remote commands on the end device, as well as the SFTP protocol for transferring necessary configuration files. This approach significantly reduces the time required for device configuration. The article presents both implementations of IoT device management systems and provides a comparative analysis of their performance.

Keywords: Internet of Things, configuration management system, Internet of Things devices, Linux IoT, SSH protocol

For citation: Vorontsov Yu. A., Mikhailova E. K. Internet of things device management system using SSH protocol. *Ingenernye tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 42-51. (In Russ.).

Введение

Интернет вещей (IoT) – это концепция, в рамках которой Интернет становится средством для объединения не только людей и компьютеров, но и множества "умных" устройств и объектов. Суть IoT заключается в том, что различные физические устройства могут быть подключены к сети и взаимодействовать друг с другом, обмениваясь полезной информацией без участия человека. Это позволяет автоматизировать множество процессов и сделать жизнь человека удобнее [1].

Главная идея IoT состоит в том, чтобы автономно обмениваться полезной информацией между различными объектами, которые могут взаимодействовать друг с другом, повышая нашу эффективность и упрощая повседневные задачи. С развитием технологий все больше устройств становятся частью этой системы, создавая единую сеть, способную работать без вмешательства человека [1].

В текущее время интернет вещей получил применение в большом количестве областей. Среди возможных применений можно выделить:

— **Умный дом** – одна из самых популярных сфер применения IoT, позволяющая улучшить комфорт, безопасность и энергоэффективность жилых помещений. Среди устройств можно выделить умные термостаты, умное освещение, системы безопасности [2].

— **Умный город** – сфера применения, которая позволяет улучшать управление ресурсами и инфраструктурой. В качестве примеров можно рассмотреть следующие примеры: умное уличное освещение, системы управления трафиком, системы управления парковками [3].

— Промышленность и производство –

Промышленный Интернет вещей (Industrial Internet of Things, IIoT)) активно используется для повышения производительности, снижения затрат и повышения безопасности. В качестве примеров можно выделить: предиктивное обслуживание, мониторинг и управление производственными процессами, системы оптимизация цепочек поставок [4].

— **Здравоохранение**, в котором IoT играет важную роль, предлагая устройства и решения для мониторинга состояния пациентов. Сюда можно отнести носимые устройства, удаленный мониторинг пациентов, умные медицинские аппараты [5].

— **Транспорт и логистика** – транспортные компании используют IoT для улучшения процессов доставки и управления транспортом. Примеры реализации: **отслеживание грузов, управление автопарком** [6].

Перечисленные примеры описывают далеко не полный перечень технологий и отраслей, в которых Интернет вещей используется для автоматизации и оптимизации процессов. Исходя из этого можно оценить важность реализации проектов интернета вещей.

При рассмотрении концепции интернета вещей также важно понимать общую многоуровневую архитектуру решений, реализуемых в данной отрасли. Существует несколько вариантов того, как можно разделять уровни архитектуры IoT [1, 7-9], будем рассматривать наиболее обобщенный вариант, включающий в себя в первую очередь компоненты для сбора, обработки и предоставления обработанных данных. Для лучшего понимания приведем обобщенный рисунок архитектуры и опишем каждый из уровней.

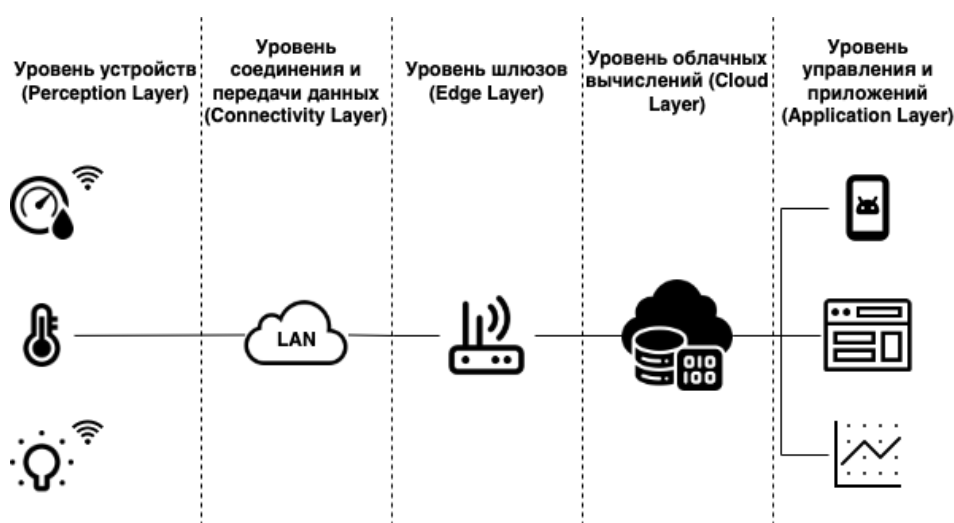


Рисунок 1. Обобщенная схема архитектуры IoT-решений

Figure 1. Generalized architecture diagram of IoT solutions

Уровень устройств (Perception Layer).

Этот уровень называется также "уровнем восприятия" и включает различные сенсоры и исполнительные механизмы (актуаторы). Основная задача устройств на этом уровне — сбор данных об окружающей среде и их отправка на следующий уровень. **Сенсоры** — это устройства для измерения параметров окружающей среды, таких как температура, влажность, давление, движение и прочее. **Исполнительные механизмы (актуаторы)** — это устройства, которые могут взаимодействовать с физическим миром, например, включать свет, открывать двери или любым другим образом воздействовать на окружающие объекты. Помимо этого, могут существовать более сложные модульные устройства, объединяющие в себе как сенсоры, так и исполнительные механизмы.

Уровень соединения и передачи данных (Connectivity Layer). На этом уровне обеспечивается передача данных, собранных сенсорами, на более высокие уровни для дальнейшей обработки. Данный уровень в себя использование различных технологий связи (например, Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave, LoRaWAN, NB-IoT, LTE/5G) и протоколов для передачи данных (например, MQTT, CoAP, HTTP, WebSockets).

Уровень шлюзов (Edge Layer). Так же данный уровень называют уровнем **граничных вычислений**. Здесь выполняется предварительная **обработка данных**, что позволяет снизить нагрузку на облако и уменьшить задержку. **Шлюзы** — устройства, которые собирают данные от множества сенсоров, фильтруют и агрегируют их, а затем отправляют в облако. Так же можно часто встретить термин **Edge Computing (граничные вычисления)** — это парадигма распределенных вычислений, подразумевающая локальную обработку данных на периферии локальной сети, в которой располагаются конечные устройства. Такой подход позволяет принимать быстрые решения и уменьшить объем данных, передаваемых в облако.

Уровень облачных вычислений (Cloud Layer). Облачный уровень включает мощные вычислительные ресурсы, которые позволяют централизованно хранить, обрабатывать и анализировать данные, поступающие от большого числа устройств и сенсоров, а также за предоставление аналитических результатов пользователям или другим компонентам. Данные могут храниться как в сырых форматах, так и в структурированном виде в базах данных. В результате могут формировать «озера данных», которые затем могут быть проанализированы

для поиска закономерностей и принятия решений. При анализе активно используются алгоритмы машинного обучения и AI.

Уровень управления и приложений (Application Layer). На этом уровне происходит взаимодействие с конечными пользователями. Пользователи получают доступ к данным и могут управлять IoT-устройствами через различные интерфейсы, например, мобильные приложения, веб-интерфейсы и т. д. Помимо этого могут реализовываться различные аналитические панели, предоставляющие визуализацию данных, отчеты и статистику для анализа работы системы.

Таким образом каждый из слоёв архитектуры решает четко определенный перечень задач. Конкретный проект интернета вещей определяет свой набор данных и операций над этими данными, которые распределяются по уровням архитектуры. Однако, с течением времени набор реализуемых операций или требования к механизмам выполнения уже существующих операций меняются. В результате чего программное обеспечение (ПО), являющееся механизмом реализации операций, требует обновления. Обновления также может потребоваться в случае обнаружения багов, проблем с производительностью или же уязвимостей. В любом случае в процессе эксплуатации IoT решения будет требоваться внесение каких-либо изменений. В таком случае следует отдельно рассматривать все уровни архитектуры, так как каждый из них требует своего подхода к обновлениям.

Первым к рассмотрению стоит принять **уровень управления и приложений**. Обновления для него распространяются в виде патчей для ПО, используемого в рамках решаемой задачи, и обуславливаются платформой, под которую реализуется конкретное приложение. Например, если пользователю доступно мобильное приложение, оно будет централизованно обновлено при помощи магазина приложений для используемой на устройстве мобильной платформы. Если же оно предоставляется в виде веб-приложения, то компания, реализующая IoT решение сможет централизованно обновить приложение на своих серверах и предоставить пользователям новый функционал.

Уровень облачных вычислений также будет обновлён через централизованный механизм, реализуемый при помощи различных инструментов централизованного управления инфраструктурой и развертывания приложений. Будь то инструменты для автоматического развертывания контейнерных сред, или же

инструменты конфигурационного управления, при любом из способов можно контролировать и гарантировать доставку обновлений на этом уровне, поскольку он также находится под контролем команды разработчика IoR решения.

При рассмотрении оставшихся трёх уровней – уровня устройств, уровня соединения и передачи данных, а также уровня устройств; уже могут существовать сложности при доставке и установке обновлений на устройства, используемые на данных уровнях. Не будем рассматривать в данной случае развертывание IIoT решений, поскольку на предприятиях развертывание, эксплуатация и сопровождение подобного рода систем осуществляется отдельными командами инженеров. Будем говорить вариантах эксплуатации, когда взаимодействие с устройствами производится пользователем, не имеющим требуемого уровня навыков для его обновления, что характерно для пользовательского IoT на примере умного дома или схожих вариантов реализации. Или же при условиях, когда устройство недоступно для прямого управления из-за сложных условий размещения или влияния внешних факторов.

В результате возникает необходимость в централизованном управлении для решения задач обновления прошивки или изменения конфигурации устройств, обусловленных требованиями к их безопасности, стабильности и надежности работы, оптимизации выполняемых устройствами процессов, улучшения пользовательского опыта и т.д. В таком случае необходимо найти способ подключения к устройству при помощи протоколов удаленного доступа или управления. Например, при помощи протокола SSH. Данный протокол реализован в большом количестве систем, в том числе в контроллерах интернета вещей. Это позволяет использовать его для реализации различных сценариев удаленного взаимодействия.

Материалы и методы исследования

Наиболее простой сценарий реализации подобного подхода можно продемонстрировать на примере устройств, построенных с применением операционных систем (ОС), в которых реализована поддержка протокола SSH. Важным замечанием будет являться то, что применение ОС подразумевает на устройствах контроллерах, используемых для централизованного сбора данных с сенсорных устройств и управления исполнительными механизмами. Для наглядности подобных устройств приведем схему их обобщенной архитектуры.

Одним из популярных подходов при создании контроллеров является использование дистрибутивов ОС на базе Linux [10-12]. Такой подход обуславливается рядом преимуществ, в число которых можно включить:

1. **Прозрачность и доступность.** Открытый исходный код Linux позволяет разработчикам анализировать каждую строку кода для выявления уязвимостей и ошибок, а также вносить улучшения и оптимизации.

2. **Высокий уровень безопасности.** В Linux реализованы мощные механизмы защиты, такие как управление доступом, шифрование данных и изоляция процессов.

3. **Гибкость и масштабируемость.** Linux поддерживает работу на самых разных аппаратных платформах – от компактных одноплатных компьютеров до мощных серверов и кластеров.

4. **Развитая экосистема программного обеспечения.** Linux предоставляет доступ к тысячам библиотек, фреймворков и инструментов с открытым исходным кодом, которые упрощают разработку IoT-приложений.

5. **Активное сообщество разработчиков.** Linux поддерживается большим сообществом разработчиков, которые создают, тестируют и развивают открытые IoT-решения.

В результате можно получить весь набор инструментов для администрирования, как и на типовом Linux-сервере. Следовательно, для обновления и управления устройствами можно применять схожие наборы инструментов. Одним из таких инструментов являются системы управления конфигурацией, например, Ansible [13], Puppet [14], Chef [15] или Salt Stack [16]. Однако, не каждый из этих инструментов подходит, так как они работают на основе разных моделей доставки конфигурации и требуют разного набора программного обеспечения для реализации данного подхода. Системы управления конфигурацией работают на основе двух моделей: push и pull. Push модель подразумевает отправку конфигурации на устройство после отдачи команды с центрального узла управления конфигурацией. Pull модель работает по принципу периодических запросов конфигурации самими управляемыми узлами с централизованного узла управления. Также существует понятие агента или же клиента – программного обеспечения, устанавливаемого на управляемые узлы для применения конфигурации. Pull модель может быть реализована только при наличии агента на управляемых устройствах, так как необходимо ПО, производящее регулярный опрос сервера конфигурации на наличие изменений. Push модель в свою очередь

может работать как при наличии агента, так и без него, поскольку весь необходимый набор исполняемых файлов для применения конфигурации можно отправить на управляемое устройство дистанционно, а после выполнения всех необходимых операций удалить с него. Одним из ограничений при реализации устройств интернета вещей является минимальный объем ресурсов, доступный системе для выполнения всех требуемых от них операций. Любое дополнительно устанавливаемое

ПО может негативно влиять на работоспособность устройства и ухудшать его быстродействие. Из чего следует, что применение любых систем, требующих установки агента, представляется невозможным. Если рассмотреть характеристики предлагаемых выше систем, которые представлены в таблице 1 [17], можно прийти к выводу, что только система Ansible может быть применена для решения поставленных задач.

Таблица 1. Сравнения систем управления конфигурацией

Table 1. Comparisons of configuration management systems

Система / System	Ansible	Chef	Puppet	SaltStack
Архитектура	Безагентная	Клиент-серверная	Клиент-серверная	Безагентная
Протокол доставки конфигурации	SSH	RabbitMQ	Mcollective	ZeroMQ
Модель доставки конфигурации	Push	Pull (Push только в корпоративной версии)	Push, Pull	Pull
Язык разработки	Python	Ruby	C++ и Clojure	Python
Язык написания конфигурации	YAML	Свой предметно-ориентированный язык	Puppet DSL	YAML

Также немаловажным фактором, работающим в пользу выбора системы Ansible, является использование ей для доставки конфигурации до конечного устройства протокола SSH, что, как было описано выше, позволяет настраивать любое устройство с ОС, имеющей реализацию данного протокола.

Чтобы подтвердить предлагаемый вариант реализации рассмотрим реальную задачу конфигурирования устройств интернета вещей в рамках реализации программы обучения с применением контроллеров на базе дистрибутива Linux. Задачи управления включают в себя следующие пункты:

1. Приведение в исходное состояние набора скриптов, формирующих логику поведения образовательного стенда;

2. Приведение в исходное состояние графических дашбордов, отображаемых в веб-интерфейсе контроллера для отслеживания значений, приходящих с сенсорных модулей, а также состояния исполнительных механизмов;

3. Приведение в исходное состояние конфигурации сервиса очередей сообщений;

4. Перезапуск сервиса очередей сообщений.

Перечень задач включает в себя лишь минимальный набор требуемых функций, который может быть расширен в случае необходимости. Все задачи обуславливаются заданиями, выполняемыми обучающимися в ходе освоения программы дисциплины. Схема инфраструктуры выглядит следующим образом (рисунок 2):

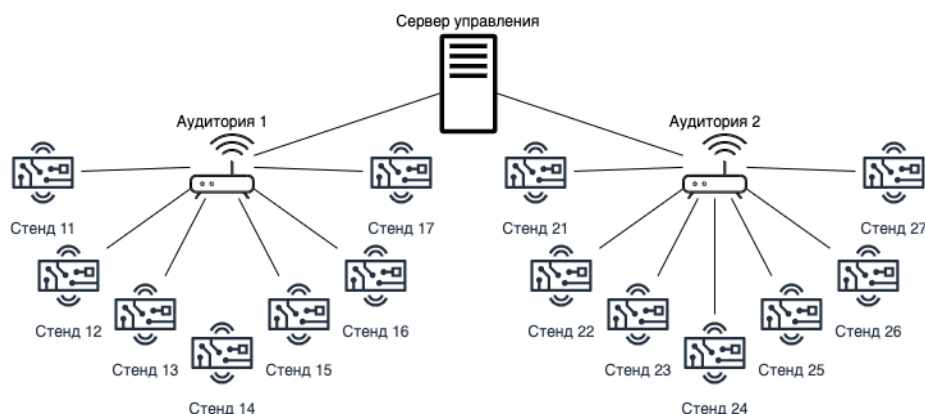


Рисунок 2. Схема инфраструктуры

Figure 2. Infrastructure scheme

Результаты исследований

В качестве инструментов реализации приложения управления применялся язык программирования Python с фреймворком Flask [19], а также библиотекой ansible. В целях реализации рассмотренных выше задач для каждой из них был реализован playbook с соответствующей логикой, который при помощи библиотеки ansible передается на выполнение системе Ansible для выбранных стендов. Также для удобства пользовательского взаимодей-

ствия реализован простой веб-интерфейс с применением шаблонов Flask и библиотеки Bootstrap. В результате реализации данного сервиса повысилась скорость выполнения задач по приведению образовательных стендов с исходное состояния для использования следующей группой обучающихся. Сравнение скорости приведения стенда в исходное состояние до и после внедрения системы можно найти на графике (рисунок 3).

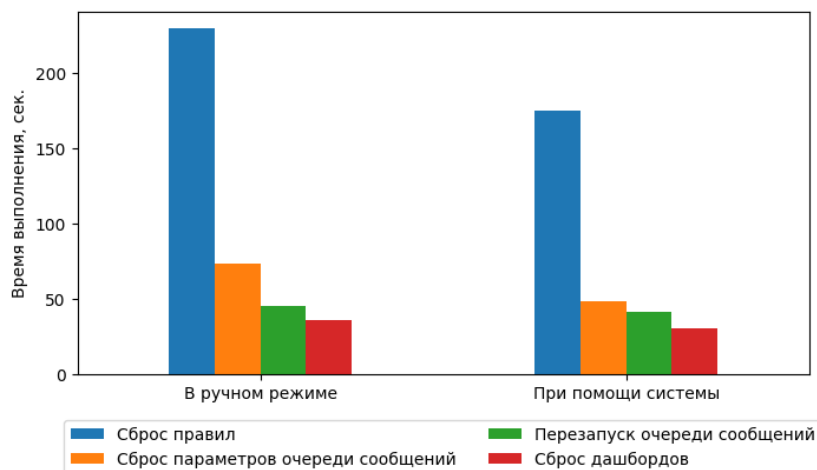


Рисунок 3. Сравнение времени выполнения операций в ручном режиме и при помощи системы управления

Figure 3. Comparison of the execution time of operations in manual mode and using the control system

При рассмотрении графика для одного стенда можно увидеть не настолько значительное снижение времени выполнения, однако, если сравнивать количество действий, требуемое для выполнения этих операций преподавателем в аудитории, результат становится более значительным. Будем считать выполнение одной операции в веб-интерфейсе равносильным выполнению одного действия – вводу одной команды – в командной строке. Результат срав-

нения представлен на рисунке 4. Также важно отметить, что при ручной настройке оператор (преподаватель) должен полностью тратить своё время на работу со стендом. При наличии же системы управления достаточно активировать операцию в веб-интерфейсе, а уже система самостоятельно выполнит все требуемые операции, освобождая тем самым время работы её оператора (преподавателя).

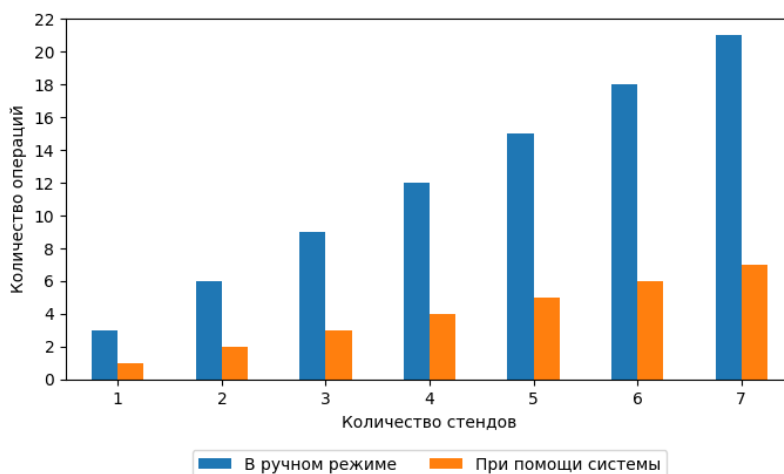


Рисунок 4. Количество действий для сброса правил в ручном режиме и при помощи системы управления

Figure 4. Number of actions to reset the rules in manual mode and using the control system

Также стоит отметить, что графики характерны показывают выполнение действий для одного стенда, а под контролем одного оператора (преподавателя) находится одновременно до 7 стендов. При ручном управлении необходимо увеличивать время выполнения операций прямо пропорционально количеству стендов. При ис-

пользовании системы время приведения стендов в требуемое состояние будет изменять в зависимости от того, насколько Ansible может передавать конфигурацию на узлы одновременно в рамках существующей сетевой инфраструктуры. Наглядно оценить время выполнения можно на графике (рисунок 5).

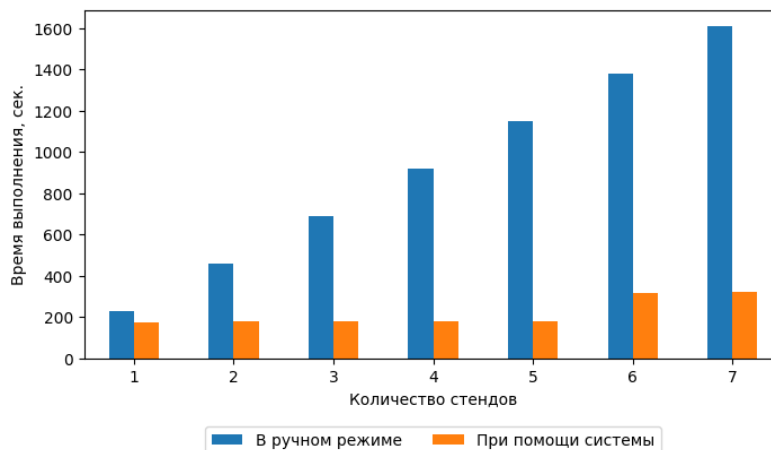


Рисунок 5. Время выполнения операции в зависимости от количества стендов

Figure 5. The time of the operation depends on the number of stands

Однако, помимо положительного влияния внедрения системы был обнаружен также и негативный факт влияния системы Ansible на контроллеры стендов. Всё заключается в технологиях, при помощи которых реализуется доставка и применение конфигурации на управляемые устройства. Сама система Ansible написана на Python, а также использует Python-модули для применения конфигурации на управляемых узлах. То есть на узел передается модуль с кодом Python, а также набор вспомогательных файлов, необходимых для конфигурирования, а затем переданный модуль исполняется на узле при помощи Python-интерпретатора, за счет чего узел приводится в требуемое состояние. Такой подход приводит к повышению нагрузки на контроллер, а также требует длительного времени выполнения. Помимо этого, поскольку контроллеры подключены к локальной сети при помощи технологии Wi-Fi, исходя из требований к мобильности образовательных стендов, значительное время расходуется на передачу всех необходимых данных до контроллера стенда. Большой объем передаваемых данных в случае приведений в исходное состояние всех стендов в рамках одной беспроводной локальной сети приводит также к замедлению скорости работы данной сети и также ведет к увеличению времени сброса параметров контроллеров.

В результате чего было принято решение реализовать новый вариант системы на основе применения непосредственно протокола SSH для управления и SFTP для доставки конфигурационных файлов. В качестве стека технологий был выбран фреймворк NextJS [20] и язык TypeScript с библиотекой ssh2 для взаимодействия с протоколами SSH и SFTP, а также библиотекой открытых компонентов shadcn/ui для реализации веб-интерфейса. Сравнение времени сброса конфигурации можно увидеть на графике (рисунок 6).

Как итог внедрения нового варианта системы было уменьшено время приведения образовательных стендов в n раз от ручного варианта и в m раз в сравнении с первой реализацией. Несмотря на это, разработка и внедрение новой системы так же не обошлась без трудностей. В процессе тестовой эксплуатации была выявлена проблема сетевого доступа к контроллерам из-за применения технологии Wi-Fi, характеризующаяся увеличением времени установления SSH-соединения из-за большого количества узлов в сети, а также увеличения расстояния от контроллера до точки доступа Wi-Fi. При применении системы Ansible данная проблема не возникала из-за наличия в ней встроенного механизма управления подключением. После внедрения подобного механизма в разработанную систему проблема сетевого подключения была решена.

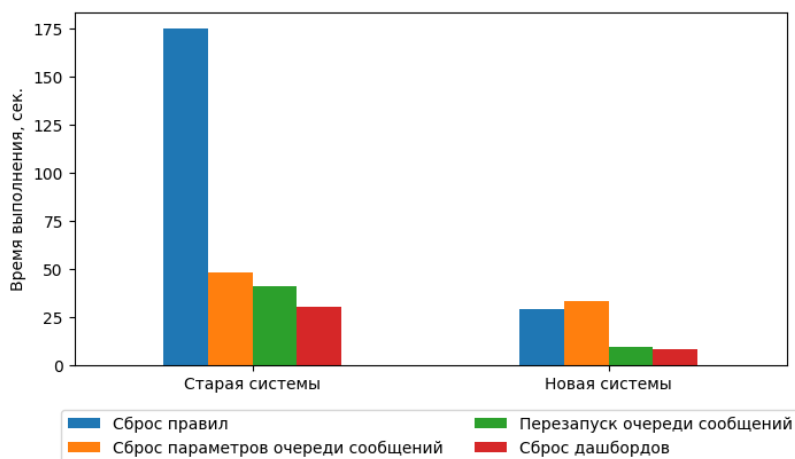


Рисунок 6. Времени выполнения операций при помощи старой и новой систем управления

Figure 6. Operation execution time using the old and new control systems

Выводы

Проведенные исследования и реализованные разработки позволяют сделать вывод, что решение задачи конфигурации устройств интернета вещей позволяет уменьшить время выполнения необходимых операций и ускорить приведение устройств в требуемое состояние. Использование систем управления конфигурацией для решения задач конфигурирования IoT

устройств дает определенные преимущества с точки зрения времени конфигурирования и повторяемости набора конфигураций. Однако, стоит учитывать накладные расходы, которые появляются при использовании подобного рода систем, и влияние нагрузки от системы конфигурационного управления на способность устройств интернета вещей сохранять свои характеристики производительности.

Литература

1. Довгаль В. А., Довгаль Д. В. Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2018. – №1 (212). – С. 129-135
2. Упоров Е.И., Белов Ю.С. Концепция интернета вещей как базовая идея создания «Умного дома» // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – №6.
3. Утегенов Н. Б. Интернет вещей (IoT) и информационные системы // Universum: технические науки. – 2023. – №7-1 (112). – С. 30-34
4. В. П. Куприяновский, Д. Е. Намиот, В. И. Дрожжинов, Ю. В. Куприяновская, М. О. Иванов Интернет Вещей на промышленных предприятиях // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – №12. – С. 69-78.
5. Аксенова Елена Ивановна, Горбатов Сергей Юрьевич Применение технологий интернета вещей в здравоохранении // Здоровье мегаполиса. – 2021. – №4. – С.101-113.
6. Кобылина Е. В., Червяков В. М. Интернет вещей в современной транспортной логистике // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – №5-2. – С. 58-62. – doi: 10.24412/2411-0450-2022-5-2-58-62
7. Щербинина М.Ю., Стефанова Н.А. Концепция интернет вещей // Креативная экономика. – 2016. – Т. 10, № 11. – С. 1323–1336. – doi: 10.18334/ce.10.11.37074
8. Москаленко Т. А., Киричек Р. В., Бородин А. С. Архитектуры промышленного Интернета Вещей // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2017. – Том 5, № 4. – С. 49–56.
9. М.Ю. Самсонов, А.Ю. Гребешков, А.В. Росляков, С.В. Ваяшин Стандартизация интернета вещей // ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ. – 2013. – № 8. – С. 10–13.
10. Зайнабидинов Рахматулло Мадаминович ОБЗОР ЯДРА LINUX И ЕГО РОЛЬ В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ // Universum: технические науки. 2024. №3 (120). С. 34-37.
11. Калхиташвили Д.Ш. Операционные системы интернета вещей: возможности, проблемы и решения / Д.Ш. Калхиташвили // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023.

- №5 (131) . — URL: <https://research-journal.org/archive/5-131-2023-may/10.23670/IRJ.2023.131.18> (дата обращения: 30.11.2024). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.131.18
- 12. Щербинина Мария Юрьевна, Стефанова Наталья Александровна Концепция интернет вещей // КЭ. — 2016. — №11. — С. 1323-1336.
- 13. Официальный сайт Ansible [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.ansible.com> (дата обращения: 29.11.2024).
- 14. Официальный сайт Puppet [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://puppet.com/> (дата обращения: 29.11.2024).
- 15. Официальный сайт Chef [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.chef.io/products/chef-infra> (дата обращения: 29.11.2024).
- 16. Официальный сайт SaltStack [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.saltstack.com> (дата обращения: 29.11.2024).
- 17. Костромин Р. О. Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2021. — №1 (21). — С. 132-145.
- 18. Воронцов, Ю. А. Комбинированная архитектура системы конфигурационного управления вычислительной инфраструктурой / Ю. А. Воронцов, Е. К. Михайлова // *International Journal of Open Information Technologies*. — 2021. — Т. 9, № 11. — С. 17-21. — EDN MMRNJJ.
- 19. Грузин, Н. А. Сравнение фреймворков для разработки веб-приложений: LARAVEL, DJANGO и FLASK / Н. А. Грузин // *Modern Science*. — 2020. — № 2-1. — С. 359-364. — EDN UQVAGU.
- 20. Князев, И. В. Анализ работы приложения с использованием server-side rendering: миграция, настройка и развертывание приложения Next.js / И. В. Князев // *Sciences of Europe*. — 2021. — № 76-1(76). — С. 71-74. — DOI 10.24412/3162-2364-2021-76-1-71-74. — EDN HXPHUY.

References

1. Dovgal Vitaliy Anatolyevich, Dovgal Dmitriy Vitalyevich Internet of Things: concept, applications and tasks // *The Bulletin of the Adyghe State University, the series "Natural-Mathematical and Technical Sciences"*. — 2018. — №1 (212). — Pp. 129-135
2. Uporov E.I., Belov Yu.S. THE CONCEPT OF INTERNET OF THINGS AS A BASIC IDEA OF THE CREATION A"SMART HOUSE" // *International Student Scientific Bulletin*. — 2018. — No.6.
3. Nurdaulet Utegenov INTERNET OF THINGS (IoT) AND INFORMATION SYSTEMS // *Universum: Technical Sciences*. — 2023. — №7-1 (112). — Pp. 30-34
4. Vasily Kupriyanovsky, Dmitry Namiot, Vladimir Drozhzhinov, Julia Kupriyanovsky, Maxim Ivanov Internet of Things in industrial plants // *International Journal of Open Information Technologies*. — 2016. — No.12. — pp. 69-78.
5. Aksenova EI, GorbatoV SYu. Application of IoT technologies in healthcare. *City Healthcare*. 2021;2(4): 101-113. doi: 10.47619/2713-2617.zm.2021.v2i4;101-113. doi: 10.47619/2713-2617.zm.2021.v2i4;101-113
6. E.V. Kobylina., V.M. Chervyakov INTERNET OF THINGS IN MODERN TRANSPORT LOGISTICS // *Journal of Economy and Business*, 2022 – vol. 5-2 (87) – pp. 58-62. – doi: 10.24412/2411-0450-2022-5-2-58-62
7. Maria Yu. Shcherbinina, Natalia A. Stefanova Concept of Internet of things // *Creative Economics*. — 2016. — vol. 10, No. 11. — pp. 1323-1336. — doi: 10.18334/ce.10.11.37074
8. Moskalenko T., Kirichek R., Borodin A.: The architecture of industrial Internet of Things // *Telecom IT*. 2017. Vol. 5. Iss. 4. pp. 49–56.
9. M.Y. Samsonov, A.Y. Grebeshkov, A.V. Roslyakov, S.V. Vanyashin Standardization of the Internet of Things // *TELECOMMUNICATION*. — 2013. — No. 8. — pp. 10-13.
10. Rakhmatullo Zainabidinov OVERVIEW OF THE LINUX KERNEL AND ITS ROLE IN MODERN INFORMATION SYSTEMS // *Universum: Technical Sciences*. 2024. No.3 (120). pp. 34-37.
11. Kalkhitashvili, D.S. "iot operating systems: opportunities, problems and solutions." *International Research Journal*, no. 5(131), May. 2023. doi: 10.23670/IRJ.2023.131.18.
12. Shcherbinina Maria Yuryevna, Stefanova Natalia Aleksandrovna The concept of the Internet of Things // *KE*. — 2016. — No.11. — pp. 1323-1336.

13. Official Website of Ansible [Electronic Resource]. Available at: <https://www.ansible.com> (Accessed: 29.11.2024).
14. Official Website of Puppet [Electronic Resource]. Available at: <https://puppet.com/> (Accessed: 29.11.2024).
15. Official Website of Chef [Electronic Resource]. Available at: <https://www.chef.io/products/chef-infra> (Accessed: 29.11.2024).
16. Official Website of SaltStack [Electronic Resource]. Available at: <https://www.saltstack.com> (Accessed: 29.11.2024).
17. Roman O. Kostromin COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESOURCE CONFIGURATION MANAGEMENT SYSTEMS FOR THE COMPUTING ENVIRONMENT OF DIGITAL TWINS FUNCTIONING // «Information and mathematical technologies in science and management». – 2021. – №1 (21). – Pp. 132-145.
18. Y.A. Vorontsov Combined architecture of the configuration management system for computing infrastructure / Y.A. Vorontsov, E.K. Mikhailova // International Journal of Open Information Technologies. – 2021. – Vol. 9, No. 11. – pp. 17-21. – EDN MMRNJJN.
19. Gruzin, N. A. Comparison of frameworks for web application development: LARAVEL, DJANGO and FLASK / N. A. Gruzin // Modern Science. – 2020. – № 2-1. – pp. 359-364. – EDN UQVAGU.
20. Kniazev I. ANALYZING APPLICATION PERFORMANCE USING SERVER-SIDE RENDERING: MIGRATING, CONFIGURING AND DEPLOYING THE NEXT.JS APPLICATION / Kniazev I. // Sciences of Europe. – 2021. – № 76-1(76). – Pp. 71-74. – DOI 10.24412/3162-2364-2021-76-1-71-74. – EDN HXPHUY.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Воронцов Юрий Алексеевич	аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», старший преподаватель кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, voroncov_yu@mirea.ru ORCID: 0000-0002-1732-6002
Михайлова Евгения Константиновна	аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», старший преподаватель кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, mihajlova_e@mirea.ru ORCID:0000-0002-0105-9325

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Vorontsov Yuriy Alekseevich	Postgraduate student, Senior lecturer of the Software and IT-standard Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University, voroncov_yu@mirea.ru ORCID: 0000-0002-1732-6002
Mikhailova Evgenia Konstantinovna	Postgraduate student, Senior lecturer of the Software and IT-standard Department, Institute of Information Technology, MIREA – Russian Technological University, mihajlova_e@mirea.ru ORCID: 0000-0002- 0105-9325

статья поступила в редакцию 08.01.2025	одобрена после рецензирования 24.01.2025	принята к публикации 07.02.2025
the article was submitted 08.01.2025	approved after reviewing 24.01.2025	accepted for publication 07.02.2025

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ И ГРАДИЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Сергей Евгеньевич Савотченко✉^{1,2}

savotchenkose@mgri.ru

¹Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, ул. Миклухо-Маклая, 23, ГСП-7, Москва, 117997, Россия

²Российский технологический университет МИРЭА, пр. Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования нелинейных уравнений математической физики при формулировании математических моделей волновых процессов в оптических кристаллах, характеризующихся нелинейным откликом и пространственным неоднородным распределением показателя преломления. Предложено развитие теории плоских волноводных структур с градиентными и нелинейно оптическими слоями, в рамках которой представляется возможным нахождение точных аналитических решений нелинейных стационарных волновых уравнений, описывающих в явном виде поперечное распределение электрического поля волноводных мод. Сформулирована математическая модель волноводных структур на основе нелинейных уравнений с распределенными коэффициентами. В качестве примеров применения сформулированной теории рассмотрены волноводные структуры, с градиентными слоями с линейным, экспоненциальным, параболическим и гиперболическим пространственными профилями, контактирующие с Керровскими и некерровскими нелинейно-оптическими средами. Получены решения, описывающие в общем виде поперечное распределение амплитуды огибающей электрического поля.

Ключевые слова: математическое моделирование, нелинейные уравнения, уравнения математической физики, нелинейное уравнение Шредингера, нелинейные волны.

Для цитирования: Савотченко С. Е. Моделирование волновых процессов в нелинейных и градиентных оптических кристаллах на основе нелинейных дифференциальных уравнений с распределенными коэффициентами // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 52-60.

Original article

MODELING OF WAVE PROCESSES IN NONLINEAR AND GRADIENT OPTICAL CRYSTALS BASED ON NONLINEAR DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH DISTRIBUTED COEFFICIENTS

Sergey E. Savotchenko✉^{1,2}

savotchenkose@mgri.ru

¹Russian Sergo Ordzhonikidze State University for Geological Prospecting, Miklukho-Maklaya St., 23, Moscow, 117997, Russia

²MIREA - Russian Technological University, Vernadsky Avenue, 78, Moscow, 119454, Russia

Abstract. The issues of using nonlinear equations of mathematical physics in formulating mathematical models of wave processes in optical crystals characterized by a nonlinear response and spatial inhomogeneous distribution of the refractive index are considered. The development of the theory of plane waveguide structures with graded-index and nonlinear optical layers is proposed, within the framework of which it seems possible to find exact analytical solutions to nonlinear stationary wave equations that explicitly describe the transverse distribution of the electric field of waveguide modes. Mathematical models of the waveguide structure are formulated based on nonlinear equations with distributed coefficients. As examples of the application of the formulated theory, waveguide structures with gradient layers with linear, exponential, parabolic and hyperbolic spatial profiles in contact with Kerr and non-Kerr nonlinear optical media are considered. Solutions are obtained that describe in general terms the transverse distribution of the amplitude of the electric field envelope.

Keywords: mathematical modeling, nonlinear equations, equations of mathematical physics, nonlinear Schrödinger equation, nonlinear waves.

For citation: Savotchenko S. E. Modeling of wave processes in nonlinear and gradient optical crystals based on nonlinear differential equations with distributed coefficients. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (1 (9)): 52-60. (In Russ.).

Введение

При формулировке математических моделей различных волновых процессов в нелинейной оптике широко используются нелинейные уравнения математической физики. Наиболее распространенным уравнением считается нелинейное уравнение Шредингера [1]. В нелинейной волновой оптике оно описывает распределение огибающей поперечной компоненты напряженности электрического поля [2]:

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \varepsilon(x, I) k^2 \Psi = 0, \quad (1)$$

где функция $\Psi = E_y(x, z)$, а $E_y(x, z)$ – компонента напряженности электрического поля, z – продольная координата – ось по направлению распространения волны вдоль плоскости контакта двух сред, x – поперечная координата – ось, перпендикулярная плоскости контакта, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $\varepsilon(x, I)$ – диэлектрическая проницаемость волноводной структуры, описывающая ее поперечное неоднородное распределение и нелинейную зависимость от напряженности поля, $I = |\Psi|^2$ – интенсивность света.

Предлагается использовать уравнение (1) для формулировки моделей плоских волноводных структур. Простейший вариант такой волноводной структуры представляет собой контакт двух кристаллов с различными оптическими свойствами, определяемыми неоднородным показателем преломления, причем его зависимости в контактирующих кристаллах принципиально различаются по физической природе. Рассматриваемые кристаллы здесь считаются немагнитными и без электрических потерь.

В частности, один кристалл характеризуется пространственной зависимостью показателя преломления от расстояния от плоскости контакта кристаллов. Такие кристаллы принято называть градиентными [3]. Другой кристалл характеризуется зависимостью показателя преломления от интенсивности света. Такие кристаллы принято называть нелинейно оптическими или просто нелинейными [4].

Теоретические основы

Будем описывать распространение поперечной электрической волна вдоль плоскости контакта кристаллов. Тогда компоненту напряженности поперечного электрического поля можно представить в виде:

$$\Psi(x, z) = \psi(x) e^{i(\beta z - \alpha t)}, \quad (2)$$

где $\psi(x)$ – поперечное распределение в пространстве напряженности электрического поля

в (амплитуда огибающей); ω – частота, β – константа распространения, связанная с эффективным показателем преломления n и волновым числом k следующим образом: $\beta = kn$, причем эффективный показатель преломления определяется как $n = ck/\omega$, где c – скорость света в вакууме.

Подставив выражение (2) в нелинейное уравнение Шредингера (1), можно получить нелинейное дифференциальное уравнение с распределенными коэффициентами [5]:

$$\frac{d^2 \psi(x)}{dx^2} + \{\varepsilon(x, I) - n^2\} k^2 \psi(x) = 0. \quad (3)$$

Сначала рассмотрим контакт двух описанных кристаллов. Поместим начало координат в плоскости yz так, чтобы ось x была перпендикулярна плоскости контакта кристаллов, которая совпадает с плоскостью $x=0$.

Если рассматривать контакт двух сред, то входящий в нелинейное уравнение (3) распределенный коэффициент (диэлектрическую проницаемость) можно представить в виде:

$$\varepsilon(x, I) = \begin{cases} \varepsilon_G(x), & x < 0, \\ \varepsilon_N(I), & x > 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\varepsilon_G(x)$ – диэлектрическая проницаемость градиентного кристалла, $\varepsilon_N(I)$ – диэлектрическая проницаемость нелинейного кристалла.

Представить поперечное распределение поля в виде:

$$\psi(x) = \begin{cases} \psi_G(x), & x < 0, \\ \psi_N(x), & x > 0. \end{cases} \quad (5)$$

В этом случае нелинейное уравнение (3), задаваемо на всей числовой оси, разделяется на два уравнения, определенных на соответствующих полуосях:

$$\psi_G''(x) + \{\varepsilon_G(x) - n^2\} k^2 \psi_G(x) = 0, \quad x < 0, \quad (6)$$

$$\psi_N''(x) + \{\varepsilon_N(I) - n^2\} k^2 \psi_N(x) = 0, \quad x > 0. \quad (7)$$

Для полноты формулировки математической модели волноводной структуры к уравнениям (6) и (7) необходимо добавить граничные условия, которые соответствуют условиям непрерывности компонент поля в плоскости контакта кристаллов:

$$\psi_N(+0) = \psi_G(-0), \quad \psi_N'(+0) = \psi_G'(-0), \quad (8)$$

и условие же исчезновения поля на бесконечности: $|\psi(x)| \rightarrow 0, |x| \rightarrow \infty$.

Сформулируем теперь модель слоистой волноводной структуры. Для определенности будем описывать плоскую симметричную относительно ее центра трехслойную структуру из немагнитных кристаллов с оптически однородными свойствами в продольном направлении. В этом случае начало координат следует

поместить в середину внутреннего слоя в плоскости yz . Ось x по-прежнему будет направлена перпендикулярно плоскостям контакта кристаллических слоев, а ось z – вдоль слоев в направлении распространения волн. Плоскости контакта кристаллических слоев расположены в плоскостях $x=\pm a$. В этом случае толщина внутреннего слоя волноводной трехслойной структуры будет равна $2a$.

Теперь входящий в нелинейное уравнение (3) распределенный коэффициент следует представить в виде

$$\varepsilon(x, I) = \begin{cases} \varepsilon_G(x), & |x| < a, \\ \varepsilon_N(I), & |x| > a. \end{cases} \quad (9)$$

а поперечное распределение поля следует представить в виде:

$$\psi(x) = \begin{cases} \psi_N^{(-)}(x), & x < -a \\ \psi_G(x), & |x| < a, \\ \psi_N^{(+)}(x), & x > a, \end{cases} \quad (10)$$

В этом случае нелинейное уравнение (3), задаваемо на всей числовой оси, разделяется на три уравнения, определенных на соответствующих интервалах:

$$\frac{d^2 \psi_N^{(-)}(x)}{dx^2} + \{\varepsilon_N(I) - n^2\} k^2 \psi_N^{(-)}(x) = 0, \quad x < -a, \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \psi_G(x)}{dx^2} + \{\varepsilon_G(x) - n^2\} k^2 \psi_G(x) = 0, \quad |x| < a, \quad (12)$$

$$\frac{d^2 \psi_N^{(+)}(x)}{dx^2} + \{\varepsilon_N(I) - n^2\} k^2 \psi_N^{(+)}(x) = 0, \quad x > a, \quad (13)$$

к которым следует добавить физически оправданные граничные условия, отвечающие условиям непрерывности компонент поля в плоскостях контакта кристаллических слоев:

$$\begin{aligned} \psi_N(\pm a \pm 0) &= \psi_G^{(\pm)}(\pm a \pm 0), \\ \frac{d\psi_N(\pm a \pm 0)}{dx} &= \frac{d\psi_G^{(\pm)}(\pm a \pm 0)}{dx}, \end{aligned} \quad (14)$$

и требования исчезновения поля на бесконечности: $|\psi_N^{(\pm)}(x)| \rightarrow 0, |x| \rightarrow \infty$.

Таким образом, уравнения (6), (7) и граничные условия (8) образуют постановку контактной краевой задачи, представляющую собой математическую формулировку модели волноводной структуры, представляющую собой математическую формулировку модели волноводной структуры, образованной вдоль контакта двух кристаллов с различными оптическими свойствами. Уравнения (11)-(13) и граничные условия (14) образуют постановку контактной краевой задачи, представляющую собой математическую формулировку модели симметричной трехслойной волноводной

структуры, образованной контактами кристаллических слоев с различными оптическими свойствами. В рамках сформулированных моделей проводится описание распространения поперечных волн оптического диапазона, локализованных в перпендикулярных плоскостям контакта направлении.

Результаты исследования и их обсуждение

Для получения точных аналитических решений сформулированных краевых задач необходимо выбрать конкретные пространственные профили диэлектрической проницаемости градиентного кристалла $\varepsilon_G(x)$ и ее зависимости от интенсивности света в нелинейных кристаллах $\varepsilon_N(I)$.

Рассмотрим наиболее распространенные градиентные профили диэлектрической проницаемости для случая градиентных кристаллов, заполняющих полупространство (для моделей волноводных структур, состоящих из двух контактирующих кристаллов).

1) Линейный профиль [6]:

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \left(1 - \Delta \frac{x}{a} \right), \quad (15)$$

где ε_0 – диэлектрической проницаемости в плоскости контакта кристаллов, $\Delta = (\varepsilon_0 - \varepsilon_a)/\varepsilon_0$ – изменение диэлектрической проницаемости от ε_0 до значения ε_a диэлектрической проницаемости на конце линейного градиентного слоя, a – толщина градиентного слоя.

В случае линейного профиля (15) уравнение (6) становится уравнением Эйри и его ограниченное на полуоси решение представимо в виде:

$$\psi(x) = \psi_0 \frac{\text{Ai}(-x/x_G + \delta)}{\text{Ai}(\delta)}, \quad (16)$$

где ψ_0 – амплитуда поля в плоскости контакта кристаллов, $\text{Ai}(x)$ – функция Эйри первого рода, $x_G = (a/k_0^2 \varepsilon_0 \Delta)^{1/3}$, $\delta = -(\varepsilon_0 - n^2)(ak/\varepsilon_0 \Delta)^{2/3}$ [7].

2) Экспоненциальный профиль [8]:

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_e + (\varepsilon_0 - \varepsilon_e) e^{2x/a}, \quad (17)$$

где ε_0 и ε_e диэлектрические константы (положительные) в плоскости контакта кристаллов и на конце градиентного слоя характерной толщины a .

В случае экспоненциального профиля (17) ограниченное на полуоси решение уравнения (6) представимо в виде:

$$\psi_G(x) = \psi_0 \frac{J_{aq}(Ve^{x/a})}{J_{aq}(V)}, \quad (18)$$

где $J_1(x)$ функция Бесселя первого рода, $V^2 = a^2 k^2 (\varepsilon_0 - \varepsilon_e)$, $q^2 = k^2 (n^2 - \varepsilon_e)$.

3) Параболический профиль [9]:

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \left(1 - \Delta \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right), \quad (19)$$

где параметры профиля (19) имеют аналогичный смысл, как и параметры линейного профиля (15).

В случае параболического профиля (19) ограниченное на полуоси решение уравнения (6) представимо в виде:

$$\psi(x) = \frac{W_{l,1/4}((x/x_G)^2)}{W_0 \sqrt{x}}, \quad (20)$$

где $W_{\alpha,l}(x)$ функция Уиттекера первого рода, $l = (\varepsilon_0 - n^2)(kx_G/2)^2$, $x_G^2 = a/k\sqrt{\varepsilon_0\Delta}$,

$W_0 = \lim_{x \rightarrow +0} \{W_{l,1/4}((x/x_G)^2)/\sqrt{x}\}$ [10].

4) Гиперболический профиль:

$$\varepsilon_G(x) = \frac{\varepsilon_0}{1 - x/a}, \quad (21)$$

где a – характерное расстояние от плоскости контакта кристаллов, на котором диэлектрическая проницаемость уменьшается вдвое $\varepsilon(a) = \varepsilon_0/2$ [11].

В случае гиперболического профиля (21) ограниченное на полуоси решение уравнения (6) представимо в виде:

$$\psi(x) = \psi_0 \frac{W_{l,1/2}(2nk(a-x))}{W_{l,1/2}(2nka)}, \quad (22)$$

где $l = \varepsilon_0 ka/2n$.

5) Профиль гиперболического тангенса (гладкая ступенька) [12]:

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \{1 - \Delta \tanh(x/a)\}. \quad (23)$$

Профиль (23) используется при моделировании плавного перехода между двумя значениями диэлектрической проницаемости или показателя преломления в прилегающей к зоне контакта кристаллов области [13]. Однако ограниченное на полуоси решение уравнения (6) для профиля (21) выражается через гипергеометрическую функцию, что делает его весьма неудобным и для анализа и малоприменимым для практического применения.

Для моделирования симметричной трехслойной волноводной структуры обычно используются симметричные относительно ее центра градиентные профили диэлектрической проницаемости.

1) Линейный:

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \left(1 - \Delta \frac{|x|}{a} \right), \quad (24)$$

где ε_0 – диэлектрической проницаемость в симметрии центре симметрии волноводной

структуры $\Delta = (\varepsilon_0 - \varepsilon_a)/\varepsilon_0$ – изменение диэлектрической проницаемости от ε_0 до значения диэлектрической проницаемости на границе раздела слоев ε_a .

Для симметричного линейного профиля (24) решение уравнения (6) на интервале $0 < x < a$ можно представить в виде [14]:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{\text{Ai}(x/x_G + \delta)}{\text{Ai}(a/x_G + \delta)}, \quad (25)$$

которое следует продолжить четным или нечетным образом на вторую полуось в зависимости от симметрии решения.

Для продолжения четного решения необходимо потребовать, чтобы функция (25) имела экстремум в середине волноводной структуры при $x=0$, поэтому $\delta = \xi_j$, $j=1, 2, \dots$, где ξ_j – нули производной функции Эйри: $\text{Ai}'(\xi_j)=0$. Это означает, что эффективный показатель преломления должен принимать дискретные значения

$$n_j^2 = \varepsilon_0 - |\xi_j|(\varepsilon_0 \Delta / ak)^{2/3}$$

Для продолжения нечетного решения необходимо потребовать, чтобы функция (25) обращалась в ноль в середине волновода при $x=0$, поэтому $\delta = \zeta_j$ – нули функции Эйри: $\text{Ai}(\zeta_j)=0$. Это означает, что эффективный показатель преломления должен принимать дискретные значения

$$n_j^2 = \varepsilon_0 - |\zeta_j|(\varepsilon_0 \Delta / ak)^{2/3}.$$

2) Параболический профиль задается выражением (19), но определенным на интервале $-a < x < a$. Тогда ограниченное решение уравнения (6) может быть выражено через полиномы Эрмита $H_j(x)$:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{H_j(x/x_0)}{H_j(a/x_0)} e^{-(x^2 - a^2)/2x_0^2}, \quad (26)$$

где $j=2m$ для четных мод и $j=2m+1$ для нечетных мод, $m=0, 1, 2, \dots$, $x_0^2 = a/k\sqrt{\varepsilon_0\Delta}$, которые могут возбуждаться только при дискретных значениях эффективного показателя преломления [15]:

$$n_j^2 = \varepsilon_0 - (2j+1)\sqrt{\varepsilon_0\Delta}/ak.$$

3) Симметричный экспоненциальный профиль:

$$\varepsilon_G(x) = \varepsilon_0 \{1 - \Delta(1 - e^{-|x|/a})\}. \quad (27)$$

Для симметричного линейного профиля (27) решение уравнения (6) на интервале $-a < x < a$ можно представить в виде:

$$\psi_G(x) = \psi_a \frac{J_{2w}(2ve^{-|x|/2a})}{J_{2w}(2ve^{-1/2})}, \quad (28)$$

где $w = ak(n^2 - \varepsilon_a)^{1/2}$, $v = ak(\Delta\varepsilon_0)^{1/2}$ [5].

Дисперсионное уравнение для четных мод: $J'_{2w}(2v)=0$. Если обозначить ξ_j корни

уравнения $J'_{\xi}(2\nu)=0$, то получается дискретный спектр значений эффективного показателя преломления:

$$n_j^2 = \varepsilon_a + (\xi_j / 2ak)^2.$$

Дисперсионное уравнение для нечетных мод: $J_{2w}(2\nu)=0$. Если обозначить ξ_j корни уравнения $J_{\xi}(2\nu)=0$, то получается дискретный спектр значений эффективного показателя преломления:

$$n_j^2 = \varepsilon_a + (\xi_j / 2ak)^2.$$

4) Профиль гиперболического секанса:

$$\varepsilon_G(x) = \frac{\varepsilon_0}{\cosh^2(x/a)} \quad (29)$$

применяется для моделирования гладкого перехода между значениями показателя преломления сердцевины и обкладок. Однако ограниченное на интервале $-a < x < a$ решение уравнения (6) для профиля (29) выражается через гипергеометрическую функцию [16].

Рассмотрим далее функции, моделирующие зависимость диэлектрическая проницаемость нелинейного кристалла $\varepsilon_N(I)$ от интенсивности света. Отметим, что уравнение (7) является нелинейным относительно искомого поля ψ . К наиболее часто используемым моделям нелинейностей, допускающих нахождение точных аналитических решений порождаемых нелинейных уравнений, относятся следующие.

1) Керровская нелинейность:

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_0 + \alpha I, \quad (30)$$

где ε_0 – невозмущенная диэлектрическая константа, α – коэффициент Керровской нелинейности [17].

В случае Керровской нелинейности (30) ограниченное на полуоси и исчезающее на бесконечности решение уравнения (6) представимо в виде:

$$\psi(x) = \frac{\sqrt{2}q_N}{k} \begin{cases} 1/\sqrt{\alpha} \cosh(q_N(x-x_N)), \alpha > 0, \\ 1/\sqrt{|\alpha|} \sinh(q_N(x-x_N)), \alpha < 0. \end{cases} \quad (31)$$

где $q_N^2 = k^2(n^2 - \varepsilon_0)$, параметр x_N определяется из граничных условий.

2) Фоторефрактивная нелинейность кристалла с диффузным механизмом формирования оптического отклика:

$$\varepsilon_N(I) = A \frac{d}{dx} \ln(I + I_d), \quad (32)$$

где A – независимая от интенсивности света и координаты константа пропорциональности, I_d – темновая интенсивность [18]. В случае, когда можно пренебречь темновой интенсивностью по сравнению с интенсивностью волны ($I_d \ll I$),

ограниченные на полуоси и исчезающие на бесконечности решения уравнения (6) с фоторефрактивной нелинейностью (32) проанализированы в [19].

3) Насыщаемая нелинейность описывается диэлектрической функцией, зависящей от частоты и амплитуды электрического поля распространяющейся в полупроводнике волны с экситон-фотонным взаимодействием и оптической экситон-бизекситонной конверсией [20]:

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{aI_0^2}{(I_0 - I(x))^2} \right), \quad (33)$$

где I_0 – интенсивность, определяемая расстройкой резонанса для частоты распространяющейся волны относительно частоты экситонного перехода, a – константа пропорциональности, определяемая константами оптической экситон-бизекситонной конверсии и экситон-фотонного взаимодействия, а также частотой расщепления экситонного состояния. Ограниченные на полуоси и исчезающие на бесконечности решения уравнения (6) с насыщаемой нелинейностью (33) проанализированы в [20].

4) Плавная ступенчатая нелинейность описывается диэлектрической функцией

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_0 \{1 + \Delta \tanh(I/I_0)\}, \quad (34)$$

где I_0 – интенсивность насыщения, применялась для описания нелинейной среды с эффектом насыщения в [21], где проанализировано решение уравнения (6) с нелинейностью (34).

5) Степенная нелинейность описывается диэлектрической функцией

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_0 I^p \quad (35)$$

где $p > 1$ – показатель степени нелинейности. Решения уравнения (6) со степенной нелинейностью с различными степенями рассматривались многими авторами [22].

6) Логарифмическая нелинейность

$$\varepsilon_N(I) = \varepsilon_0 \ln(I/I_0) \quad (36)$$

часто используется в нелинейном уравнении Шредингера при описании конденсата Бозе-Эйнштейна [23, 24].

7) Ступенчатая нелинейность

$$\varepsilon_N(I) = \begin{cases} \varepsilon_1, & I < I_s \\ \varepsilon_2, & I > I_s \end{cases} \quad (37)$$

где $\varepsilon_{1,2}$ – невозмущенные диэлектрические константы, I_s – пороговая интенсивность переключения. Модель нелинейной среды (37) описывает мгновенное (ступенчатое) переключение от одного значения ε_1 диэлектрической константы к другому ε_2 при достижении порогового значения интенсивности переключения

I_s . В [25, 26] рассматривались поверхностные волны в такой нелинейной среде, моделируемой ступенчатой нелинейностью (37). Было показано, что при вблизи поверхности такой нелинейной среды формируется приповерхностный слой (оптический домен), в котором значение диэлектрической константы отличается от ее значения в остальной среде. Такая модель использовалась Капланом при описании оптических мультистабильных солитонов [27, 28]. Также мы неоднократно использовали модель ступенчатой нелинейности в силу простоты решения уравнения (6) с диэлектрической проницаемостью в форме (37) [7, 29, 30].

8) Переключение Керровской нелинейности:

$$\varepsilon_N(I) = \begin{cases} \varepsilon_1 + \alpha_1 I, & I < I_s \\ \varepsilon_2 + \alpha_2 I, & I > I_s \end{cases} \quad (38)$$

где $\alpha_{1,2}$ – коэффициенты Керровской нелинейности [31]. Решения уравнения (6) с диэлектри-

ческой проницаемостью в форме (38) приведены в ряде наших недавних работ [32, 33, 34].

Выводы

Таким образом, можно получить целый ряд новых решений контактных краевых задач, комбинируя различные пространственные профили диэлектрической проницаемости, соответствующих градиентным кристаллам с одной стороны от плоскости контакта, с нелинейными зависимостями от интенсивности света нелинейно оптических кристаллов с другой стороны от плоскости контакта [35]. Соответствующие функции сшиваются граничными условиями и полученные таким путем решения контактных краевых задач могут применяться для описания распространения поверхностных волн и волноводных мод в распределенных нелинейных и градиентных волноводных структурах.

Литература

1. Ньюэлл, А. Солитоны в математике и физике // М.: Мир, 1989.
2. Кившарь, Ю.С. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов / Кившарь, Ю.С., Агравал, Г.П. М.: Физматлит, 2005. 648 с.
3. Chen, C-L. Foundations for guided-wave optics, John Wiley & Sons, Inc., 2005, 462 p.
4. Leble, S. Waveguide Propagation of Nonlinear Waves. Springer, New York, 2019, 288 p.
5. Adams, M. J. An Introduction to Optical Waveguides, Wiley, Chichester, 1981.
6. Touam, T. Analytical solution for a linearly graded-index-profile planar waveguide / Touam, T. Yergeau, F. Appl. Opt. 1993, 32, 309-312,
7. Savotchenko, S.E. Surface waves in linearly graded-index and intensity-dependent index layered structure // Journal of the Optical Society of America A, 2022, 39(7), 1210-1217.
8. Huang, S.-Y. Ray optics of a planar waveguide with an exponential index profile // Huang, S.-Y., Wang, S. Journal of Applied Physics, 1984, 55(4), 647-651.
9. Weik, M.H. Parabolic refractive-index profile. In: Computer Science and Communications Dictionary, Springer, Boston, MA., 2000.
10. Savotchenko, S.E. Surface waves propagating along the interface between a parabolic graded-index medium and a self-focusing nonlinear medium: exact analytical solution // Journal of Optics, 2022, 24(10), 105501.
11. Singh, B. K. Multi-channel photonic bandgap engineering in hyperbolic graded index materials embedded one-dimensional photonic crystals / Singh, B. K., Bambole, V., Rastogi, V., Pandey, P. C. Opt. Laser Technol. 2020, 129, 106293.
12. Biricik, V.W. Hyperbolic tangent graded-index antireflection coatings // Optical Society of America Annual Meeting, Technical Digest Series. 1991, ThMM52.
13. Rana, B. TE-Wave Propagation Over an Impedance-Matched RHM to LHM Transition in a Hollow Waveguide / Rana, B., Svendsen, B.B., Dalarsson, M. Progress In Electromagnetics Research M, 2022, 110, 1-10.
14. Savotchenko, S.E. New types of transverse electric nonlinear waves propagating along a linearly graded-index layer in a medium with Kerr nonlinearity // Optical and Quantum Electronics. 2023, 55(1), 74.
15. Savotchenko, S.E. Guided waves propagating along a parabolic graded-index slab in Kerr nonlinear medium // Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(10) 898.
16. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учебное пособие для вузов : в 10 т. Том 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского. - 6-е изд., испр. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2016. 800 с.

17. Čada, M. Optical Wave Propagation in Kerr Media. In: Wave Propagation Theories and Applications / Čada, M., Qasymeh, M., Pištora, J. IntechOpen, 2013, 175-192.
18. Nurligareev, D.Kh. Characteristics of surface photorefractive waves in a nonlinear SBN-75 crystal coated with a metal film / Nurligareev, D.Kh., Usievich, B.A., Sychugov, V.A., Ivleva, L.I. *Quantum Electronics*, 2013, 43, 14-20.
19. Савотченко, С.Е. Влияние температуры на перераспределение потока энергии, уносимого поверхностными волнами вдоль границы раздела кристаллов с различными механизмами формирования нелинейного отклика // *Письма в ЖЭТФ*, 2019, 109(11), 778-782.
20. Korovai, O.V. Nonlinear s-polarized quasi-surface waves in the symmetric structure with a metamaterial core // *Phys. Solid State*, 2015, 57, 1456-1462.
21. Fedorov, L.V. Nonlinear surface waves with allowance for the saturation effect / Fedorov, L.V., Ljahomskaja, K.D. *Tech. Phys. Lett.* 1997, 23, 915-916.
22. Kursseva, V. Electromagnetic wave propagation in a layer with power nonlinearity / Kursseva, V., Tikhov, S., Valovik, D. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2019, 28, 1950009.
23. Tae Gab Ha, Sufficient condition for logarithmic nonlinearity in nonlinear evolution equations *Math. Meth. in Appl. Sci.* 2020, 7, 9611-9615.
24. Vowe, S. Detecting a logarithmic nonlinearity in the Schrödinger equation using Bose-Einstein condensate / Vowe, S., Lämmerzahl, C., Krutzik, M. *Phys. Rev. A* 2020, 101, 043617.
25. Khadzhi, P.I. Nonlinear surface waves for the simplest model of nonlinear medium / Khadzhi, P.I., Fedorov, L.V. *Phys. Tech. Lett.* 1991, 61, 110-113.
26. Lyakhomskaya, K.D., Hadji, P.I. Self-reflection effect in the simplest non-linear medium / Lyakhomskaya, K.D., Hadji, P.I. *Tech. Phys.* 2000, 70, 86-90.
27. Kaplan, A. E. Bistable solitons // *Phys. Rev. Lett.* 1985, 55, 1291-1294.
28. Kaplan, A.E. Multistable self-trapping of light and multistable soliton pulse propagation // *IEEE J. Quant. Electron.* 1985, QE-21, 1538-1543.
29. Savotchenko, S.E. Propagation of nonlinear surface waves along the interface between Kerr type crystal and medium characterized by stepwise dielectric permittivity // *Journal of Optics*, 2020, 22(6), 065504.
30. Savotchenko, S.E. Surface waves propagating along the interface separating an exponential graded-index medium and the medium with a step change in the dielectric constant // *Optik*, 2022. 271(12), 170092.
31. Савотченко, С.Е. Самокализация световых пучков в среде с мгновенным переключением керровской нелинейности // *ЖЭТФ*, 2020, 158(5), 781-791.
32. Savotchenko, S.E. Surface waves in a medium with Kerr nonlinearity switching // *Physics Letters A*, 2020, 384(16), 126451.
33. Savotchenko, S.E. Nonlinear waves in crystal characterized by the jump switching of between self-focusing and defocusing nonlinearity // *Romanian Reports in Physics*, 2020, 72(3), 412.
34. Savotchenko, S.E. Surface waves in a thin-film waveguide structure with sharp change in a self-focusing nonlinearity // *Optik*, 2020, 224(12) 165668.
35. Савотченко, С.Е. Модели волноводов, сочетающих градиентные и нелинейно-оптические слои. // *Russian Technological Journal*. 2023, 11(4), 84-93.

References

1. Newell, A. Solitons in mathematics and physics // Moscow: Mir, 1989.
2. Kishar, Yu.S. Optical solitons. From fiber light guides to photonic crystals / Kishar, Yu.S., Agraval, G.P. M.: Fizmatlit, 2005. 648 p.
3. Chen, C-L. Foundations for guided-wave optics, John Wiley & Sons, Inc., 2005, 462 p.
4. Leble, S. Waveguide Propagation of Nonlinear Waves. Springer, New York, 2019, 288 p.
5. Adams, M. J. An Introduction to Optical Waveguides, Wiley, Chichester, 1981.
6. Touam, T. Analytical solution for a linearly graded-index-profile planar waveguide / Touam, T. Yergeau, F. *Appl. Opt.* 1993, 32, 309-312,
7. Savotchenko, S.E. Surface waves in linearly graded-index and intensity-dependent index layered structure // *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39(7), 1210-1217.

8. Huang, S.-Y. Ray optics of a planar waveguide with an exponential index profile // Huang, S.-Y., Wang, S. Journal of Applied Physics, 1984, 55(4), 647-651.
9. Weik, M.H. Parabolic refractive-index profile. In: Computer Science and Communications Dictionary, Springer, Boston, MA., 2000.
10. Savotchenko, S.E. Surface waves propagating along the interface between a parabolic graded-index medium and a self-focusing nonlinear medium: exact analytical solution // Journal of Optics, 2022, 24(10), 105501.
11. Singh, B. K. Multi-channel photonic bandgap engineering in hyperbolic graded index materials embedded one-dimensional photonic crystals / Singh, B. K., Bambole, V., Rastogi, V., Pandey, P. C. Opt. Laser Technol. 2020, 129, 106293.
12. Biricik, V.W. Hyperbolic tangent graded-index antireflection coatings // Optical Society of America Annual Meeting, Technical Digest Series. 1991, ThMM52.
13. Rana, B. TE-Wave Propagation Over an Impedance-Matched RHM to LHM Transition in a Hollow Waveguide / Rana, B., Svendsen, B.B., Dalarsson, M. Progress In Electromagnetics Research M, 2022, 110, 1-10.
14. Savotchenko, S.E. New types of transverse electric nonlinear waves propagating along a linearly graded-index layer in a medium with Kerr nonlinearity // Optical and Quantum Electronics. 2023, 55(1), 74.
15. Savotchenko, S.E. Guided waves propagating along a parabolic graded-index slab in Kerr nonlinear medium // Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(10) 898.
16. Landau, L. D. Theoretical physics : a textbook for universities : in 10 volumes. Volume 3. Quantum Mechanics (non-relativistic theory) / L. D. Landau, E. M. Lifshits ; edited by L. P. Pitaevsky. - 6th ed., ispr. - Moscow : FIZMATLIT, 2016. 800 p.
17. Čada, M. Optical Wave Propagation in Kerr Media. In: Wave Propagation Theories and Applications / Čada, M., Qasymeh, M., Pištora, J. IntechOpen, 2013, 175-192.
18. Nurligareev, D.Kh. Characteristics of surface photorefractive waves in a nonlinear SBN-75 crystal coated with a metal film / Nurligareev, D.Kh., Usievich, B.A., Sychugov, V.A., Ivleva, L.I. Quantum Electronics, 2013, 43, 14-20.
19. Savotchenko, S.E. Influence of temperature on the redistribution of the energy flow carried away by surface waves along the interface of crystals with various mechanisms of nonlinear response formation // Letters to the JETF, 2019, 109(11), 778-782.
20. Korovai, O.V. Nonlinear s-polarized quasi-surface waves in the symmetric structure with a metamaterial core // Phys. Solid State, 2015, 57, 1456-1462.
21. Fedorov, L.V. Nonlinear surface waves with allowance for the saturation effect / Fedorov, L.V., Ljahomskaja, K.D. Tech. Phys. Lett. 1997, 23, 915-916.
22. Kursseva, V. Electromagnetic wave propagation in a layer with power nonlinearity / Kursseva, V., Tikhov, S., Valovik, D. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2019, 28, 1950009.
23. Tae Gab Ha, Sufficient condition for logarithmic nonlinearity in nonlinear evolution equations Math. Meth. in Appl. Sci. 2020, 7, 9611-9615.
24. Vowe, S. Detecting a logarithmic nonlinearity in the Schrödinger equation using Bose-Einstein condensate / Vowe, S., Lämmerzahl, C., Krutzik, M. Phys. Rev. A 2020, 101, 043617.
25. Khadzhi, P.I. Nonlinear surface waves for the simplest model of nonlinear medium / Khadzhi, P.I., Fedorov, L.V. Phys. Tech. Lett. 1991, 61, 110-113.
26. Lyakhomskaya, K.D., Hadji, P.I. Self-reflection effect in the simplest non-linear medium / Lyakhomskaya, K.D., Hadji, P.I. Tech. Phys. 2000, 70, 86-90.
27. Kaplan, A. E. Bistable solitons // Phys. Rev. Lett. 1985, 55, 1291-1294.
28. Kaplan, A.E. Multistable self-trapping of light and multistable soliton pulse propagation // IEEE J. Quant. Electron. 1985, QE-21, 1538-1543.
29. Savotchenko, S.E. Propagation of nonlinear surface waves along the interface between Kerr type crystal and medium characterized by stepwise dielectric permittivity // Journal of Optics, 2020, 22(6), 065504.
30. Savotchenko, S.E. Surface waves propagating along the interface separating an exponential graded-index medium and the medium with a step change in the dielectric constant // Optik, 2022. 271(12), 170092.
31. Savotchenko, S.E. Self-localization of light beams in a medium with instantaneous switching of Kerr nonlinearity // JETF, 2020, 158(5), 781-791.
32. Savotchenko, S.E. Surface waves in a medium with Kerr nonlinearity switching // Physics Letters A, 2020, 384(16), 126451.

33. Savotchenko, S.E. Nonlinear waves in crystal characterized by the jump switching of between self-focusing and defocusing nonlinearity // *Romanian Reports in Physics*, 2020, 72(3), 412.

34. Savotchenko, S.E. Surface waves in a thin-film waveguide structure with sharp change in a self-focusing nonlinearity // *Optik*, 2020, 224(12) 165668.

35. Savotchenko, S.E. Models of waveguides combining gradient and nonlinear optical layers. // *Russian Technological Journal*. 2023, 11(4), 84-93.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Савотченко Сергей Евгеньевич	доктор физико-математических наук, доцент, Российского государственного геолого-разведочного университета им. Серго Орджоникидзе, профессор кафедры высшей математики и физики; Российского технологического университета - МИРЭА, профессор кафедры высшей математики, savotchenkose@mgri.ru ORCID: 0000-0002-7158-9145 SPIN - код: 2552-4344 ResearcherID: N-9227-2018 ScopusID: 6603577988

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Savotchenko Sergey Evgen'evich	doctor of physico-mathematical sciences, associate professor, Russian State Geological Exploration University. Sergo Ordzhonikidze, professor of the Department of Higher Mathematics and Physics; Russian Technological University - MIREA, professor of the Department of Higher Mathematics, savotchenkose@mgri.ru ORCID: 0000-0002-7158-9145 SPIN - code: 2552-4344 ResearcherID: N-9227-2018 ScopusID: 6603577988

статья поступила в редакцию 08.01.2025	одобрена после рецензирования 23.01.2025	принята к публикации 10.02.2025
the article was submitted 08.01.2025	approved after reviewing 23.01.2025	accepted for publication 10.02.2025

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ПОРЯДКА ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ГИЛЬБЕРТА В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Виктория Игоревна Герасимова gerasimowa.victoria@yandex.ru

Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского, ул. Степана Разина, д. 26, г. Калуга, Калужская область, 248023, Россия

Аннотация. Фильтр Гильберта является важным инструментом в области обработки сигналов. Однако выбор порядка цифрового фильтра Гильберта представляет собой сложную задачу. В данной статье рассматриваются проблемы, связанные с выбором порядка фильтра, такие как влияние на характеристики фильтрации, вычислительная сложность и устойчивость к шуму. Также представлены рекомендации по оптимальному выбору порядка фильтра в зависимости от конкретных приложений.

Ключевые слова: сигнал, преобразование Гильберта, цифровой фильтр Гильберта, распознавание сигналов, хэш-функция, критерий типа Колмогорова-Смирнова.

Для цитирования: Герасимова В. И. Особенности выбора порядка цифрового фильтра Гильберта в задачах анализа сигналов // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 61-70.

Original article

FEATURES OF CHOOSING THE ORDER OF THE DIGITAL HILBERT FILTER IN SIGNAL ANALYSIS TASKS

Victoria I. Gerasimova gerasimowa.victoria@yandex.ru

Kaluga State University named after K. E. Tsiolkovsky, 26 Stepan Razin St., Kaluga, Kaluga Region, 248023, Russia

Abstract. The Hilbert filter is an important tool in the field of signal processing. However, choosing the order of the Hilbert digital filter is a difficult task. This article discusses problems related to the choice of filter order, such as the effect on filtration characteristics, computational complexity, and noise resistance. Recommendations are also provided on the optimal choice of the filter order depending on specific applications.

Keywords: signal, Hilbert transform, digital Hilbert filter, signal recognition, hash function, Kolmogorov-Smirnov type criterion.

For citation: Gerasimova V. I. Features of choosing the order of the digital Hilbert filter in signal analysis tasks. *Ingenierne tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 61-70. (In Russ.).

Введение

Фильтр Гильберта (ФГ) широко используется в обработке сигналов для создания аналитических сигналов, которые содержат информацию о фазе и амплитуде оригинального сигнала. Основной задачей фильтра Гильберта является преобразование реального сигнала в комплексный, где действительная часть соответствует оригинальному сигналу, а мнимая часть — его гильберт-образу. Выбор порядка фильтра является критически важным этапом, так как он напрямую влияет на характеристики фильтрации, такие как частотная характеристика, переходные процессы и устойчивость к шуму [1].

К основным проблемам выбора порядка фильтра можно отнести:

1. Влияние на частотные характеристики. Порядок фильтра определяет его частотные характеристики, включая полосу пропускания и затухание. Более высокий порядок обеспечи-

вает более резкое затухание вне полосы пропускания, но может привести к увеличению времени задержки и искажению сигнала. Это может быть критично в системах, где важна высокая точность временных характеристик.

2. Вычислительная сложность. С увеличением порядка фильтра возрастает вычислительная сложность его реализации. Это может стать значительной проблемой в реальном времени, особенно для приложений с ограниченными вычислительными ресурсами, таких как мобильные устройства или встроенные системы. Поэтому необходимо находить баланс между желаемыми характеристиками фильтра и доступными вычислительными ресурсами.

3. Устойчивость к шуму. Выбор порядка фильтра также влияет на устойчивость к шуму. Высокий порядок может привести к увеличению чувствительности к шуму, что особенно актуально при работе с низкоамплитудными сигналами на фоне шума [2]. В таких случаях может быть целесообразно использовать

фильтры с более низким порядком для обеспечения большей устойчивости.

В данной работе представлены результаты различных подходов к выбору порядка цифрового фильтра Гильберта (ЦФГ).

Материал и методы исследования

Преобразование Гильберта (ПГ) – это математический оператор, ставящий в соответствие действительной функции функцию в той же области. ПГ позволяет формировать анали-

тический сигнал, где действительная часть соответствует исходному сигналу, а мнимая часть – его ПГ. Таким образом, ПГ – это результат свертки сигнала $s(t)$ с функцией $h(t)=1/(\pi \cdot t)$, т. е. $s_{\perp}(t)=s(t)*h(t)$.

По свойству ПГ для сигнала $s(t)$ при помощи ПГ можно получить ортогональное дополнение $s_{\perp} \perp t$, такое, что $\int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot s_{\perp}(t) dt = 0$. При этом $s_{\perp}(t) \neq 0$ [1, 3]:

$$s_{\perp}(t) = P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau = \frac{1}{\pi} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{t-\varepsilon} \frac{s(\tau)}{(t-\tau)} d\tau + \int_{t+\varepsilon}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{(t-\tau)} d\tau \right] \quad (1)$$

Преобразование или оператор Гильберта (1) позволяет сформировать аналитический сигнал – комплексный сигнал вида:

$$z(t) = s(t) + i s_{\perp}(t) = S(t) \cdot e^{i\Phi(t)}, \quad (2)$$

$$S(t) = \sqrt{s^2(t) + s_{\perp}^2(t)}, \quad \Phi(t) = \arctg \frac{s_{\perp}(t)}{s(t)}. \quad (3)$$

Закон изменения частоты аналитического сигнала задается выражением:

$$\omega(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}. \quad (4)$$

Цифровое преобразование Гильберта (ЦПГ) – это дискретная реализация ПГ, используемая для обработки цифровых сигналов. Существует несколько методов реализации ЦПГ, наиболее распространенным из которых

является использование цифрового фильтра Гильберта (ЦФГ). ЦФГ – это линейный фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ). Ядро ПГ, обозначаемое как $h(t)=1/(\pi \cdot t)$, служит импульсной характеристикой линейного фильтра, который генерирует ортогональное дополнение к входному сигналу. В дискретном или цифровом формате импульсная характеристика цифрового фильтра Гильберта равна нулю для четных k , а для нечетных $k=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ [11]. Импульсные характеристики ЦФГ различных порядков представлены на рисунке 1.

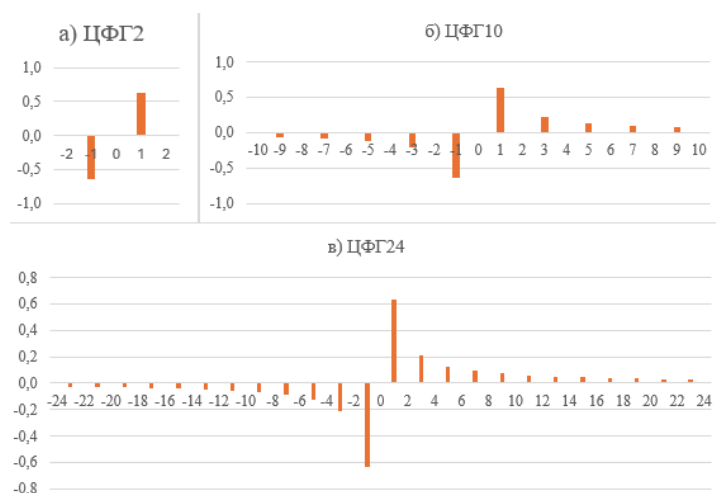


Рисунок 1. Импульсные характеристики ЦФГ разных порядков

Figure 1. Pulse characteristics of CFG of different orders

В качестве критериев выбора порядка ЦФГ можно рассматривать:

1. Скалярное произведение. В соответствии с определением ПГ формирует ортогональный к исходному сигнал, а следовательно, скалярное произведение входного сигнала и его гильберт-образа должно равняться 0.

2. Восстановление сигнала. Усечение импульсной характеристики приводит к изме-

нениям амплитуды ортогонального дополнения к исходному сигналу. Согласно свойствам ПГ его применение к ортогональному дополнению должно восстановить исходный сигнал с противоположным знаком.

3. Использование ЦФГ для построения хэш-функций. При нормировке сигнала и его гильберт-образа можно сформировать характеристики сигнала, инвариантные к мас-

штабно-трансляционным изменениям, что играет важную роль в обработке сигналов.

Основная идея разработки инвариантных информативных признаков сигналов заключается в совершенствовании метода их гистограммного анализа. Гистограммы традиционно применяются для изучения статистической структуры сигналов [12], поскольку при нормализации амплитуды сигналов можно получить гистограммы, которые не зависят от амплитуды, временного положения и масштабов сигналов. Тем не менее, гистограммы являются детерминированными представлениями сигналов, так как произвольная перестановка отсчетов сигналов не приводит к изменению их гистограмм.

Следует отметить, что из-за нелокального характера ядра $h(n)$ ПГ (рисунок 1) отсчеты в сигнале $s_{\perp}(n)$ оказываются причинно-связанными. Поэтому возможно построить новый сигнал - своеобразный хэш-образ $H(n)=H[s(n),s_{\perp}(n)]$, гистограмма $hist(H)$ значе-

ний которого не будет вырождена по перетасовке отсчетов сигнала $s(n)$.

На основе оператора эволюции была теоретически обоснована функция (5). Результаты численных экспериментов также показали, что именно функция (5) при построении гистограмм дает наибольшие различия по среднеквадратичному отклонению при изменении форм сигналов [1].

$$H(n) = \frac{s(n)s(n-1)}{\sqrt{s^2(n) + s_{\perp}^2(n)}\sqrt{s^2(n-1) + s_{\perp}^2(n-1)}} + \frac{s_{\perp}(n)s_{\perp}(n-1)}{\sqrt{s^2(n) + s_{\perp}^2(n)}\sqrt{s^2(n-1) + s_{\perp}^2(n-1)}}. \quad (5)$$

Результаты и обсуждения

При проведении численного эксперимента были выбраны сигналы разной формы (одно колебание): треугольной, гауссовой, синусоидальной, пилообразной, прямоугольной. Сигналы представлены на рисунке 2 а)-д). Результаты вычислений скалярного произведения сигнала на его гильберт-образ представлены на рисунке 3.

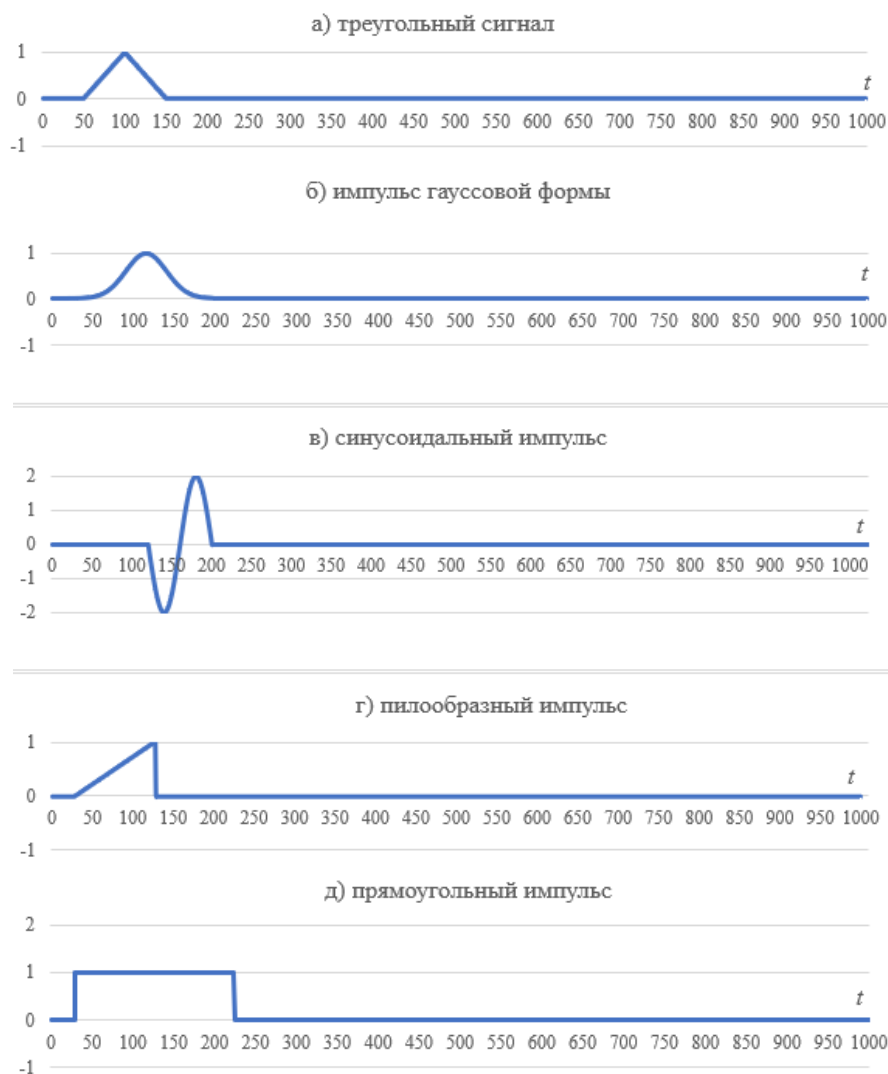


Рисунок 2. Импульсные сигналы различной формы

Figure 2. Pulse signals of various shapes

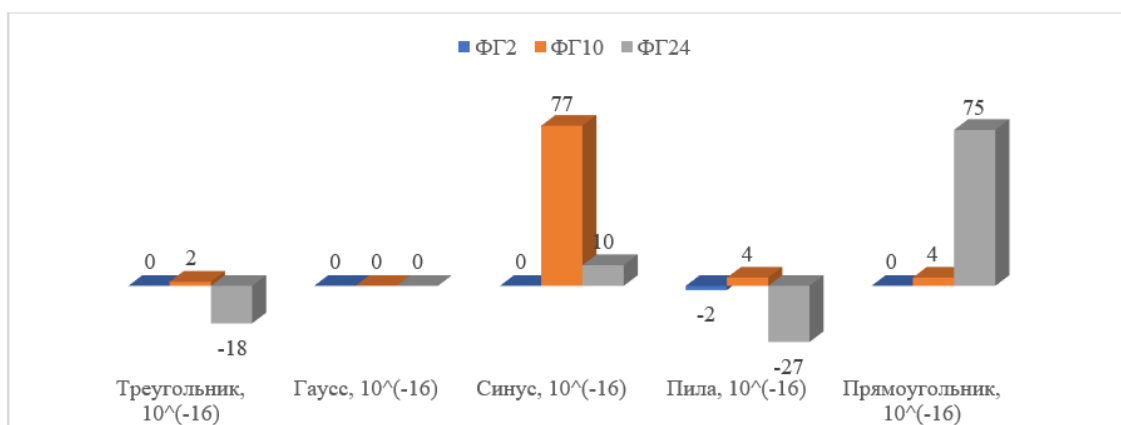


Рисунок 3. Отклонение скалярного произведения от 0 при разных порядках фильтра

Figure 3. Deviation of the scalar product from 0 at different filter orders

Можно заметить, что с увеличением числа отсчетов скалярное произведение имеет лишь флуктуационное отличие от нуля для всех сигналов, кроме сигнала гауссовой формы. Для него порядок фильтра не влиял на значение. Таким образом, скалярное произведение не может быть использовано в качестве критерия для выбора наилучшего порядка фильтра.

Во втором подходе в качестве входных сигналов сначала использовались гладкие сигналы (синус и гауссиана). Для синуса идеальное преобразование Гильберта – косинус (фаза сдвигается на $\pi/2$). Увеличение длины фильтра позволяет получить ортогональное дополнение без потерь в амплитуде с помощью ЦФГ 24 (рисунок 4), однако, вместе с этим фаза сигнала смещается больше, чем на 90° .

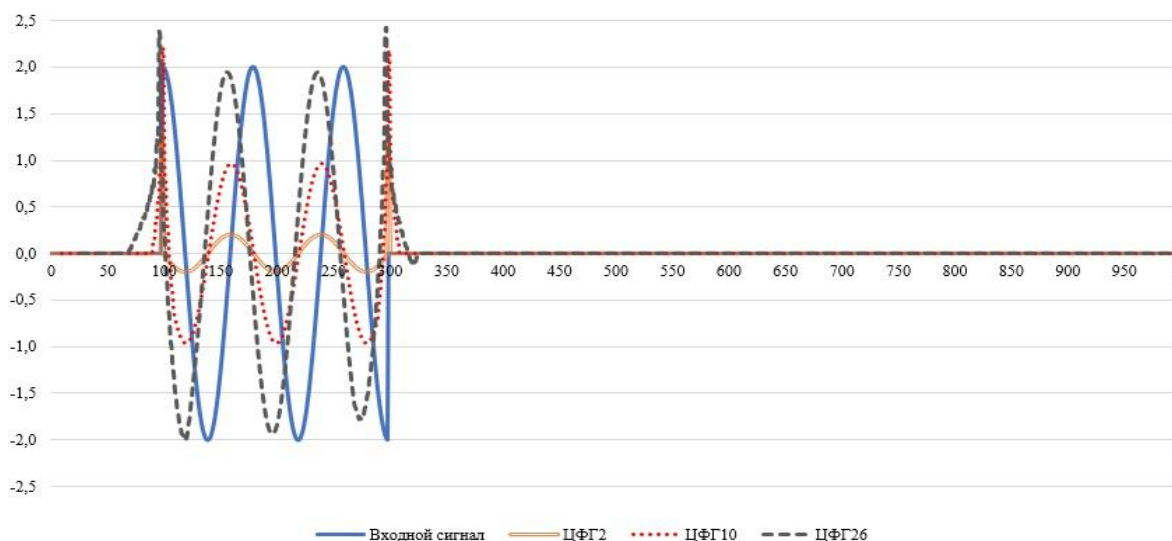


Рисунок 4. Входной сигнал и его преобразования Гильберта ЦФГ различных порядков

Figure 4. The input signal and its Hilbert CFT transformations of various orders

В восстановленном сигнале с увеличением длины фильтра наблюдается ошибка в восстановлении амплитуды сигнала (рисунок 5), однако смещения фаз практически соответ-

ствует идеальному сдвигу на $\pi/2$ (в ЦФГ 24 ошибка составляет 4%, а в ЦФГ2 0%). Зависимость ошибки амплитуды от длины фильтра представлена на рисунке 6.

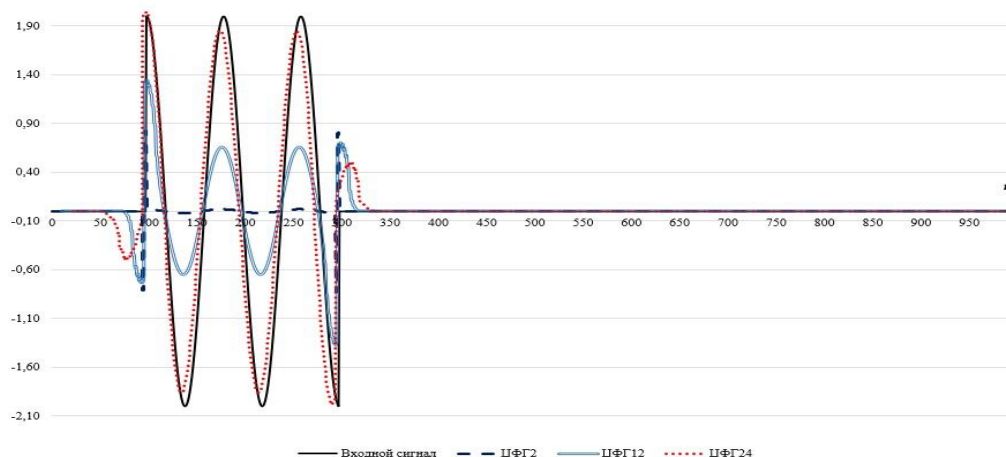


Рисунок 5. Входной сигнал и восстановленный при помощи двойного преобразования Гильберта ЦФГ различных порядков

Figure 5. The input signal and the restored one using the double Hilbert transform of the CFG of various orders

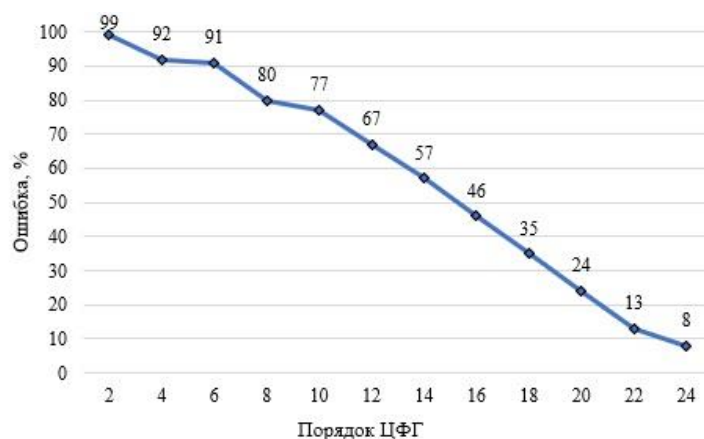


Рисунок 6. Ошибка восстановления амплитуды сигнала в зависимости от порядка фильтра

Figure 6. Error in restoring the signal amplitude depending on the filter order

Для гауссового сигнала эксперимент показал аналогичное поведение в смещение фаз (рисунок 7), однако, восстановить сигнал даже используя ЦФГ34 порядка не удалось. Стоит

отметить, что начиная с фильтра длиной 24 отсчета восстановленный сигнал не изменялся по амплитуде (рисунок 8).

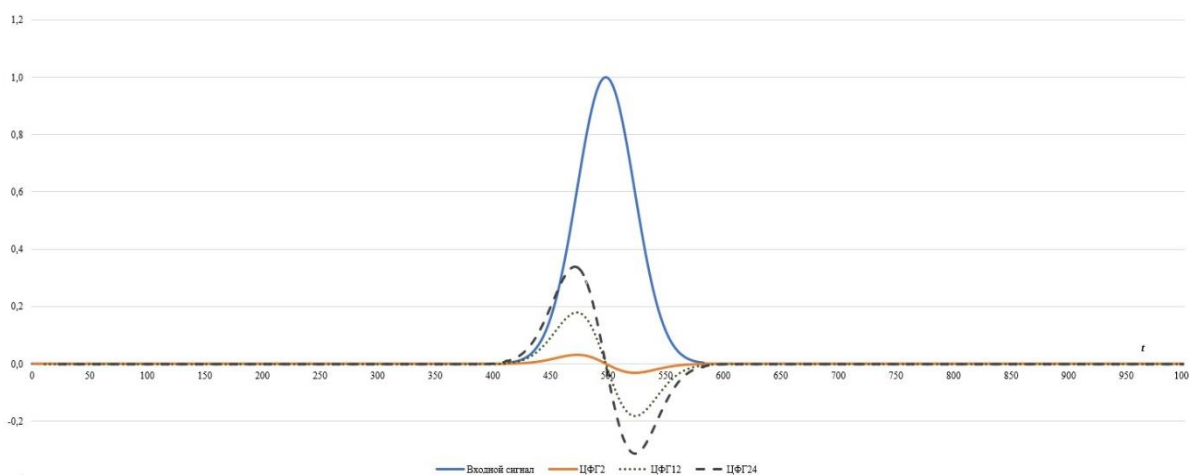


Рисунок 7. Входной сигнал (гауссовой формы) и его преобразования Гильберта ЦФГ различных порядков

Figure 7. The input signal (Gaussian form) and its Hilbert transform CFG of various orders

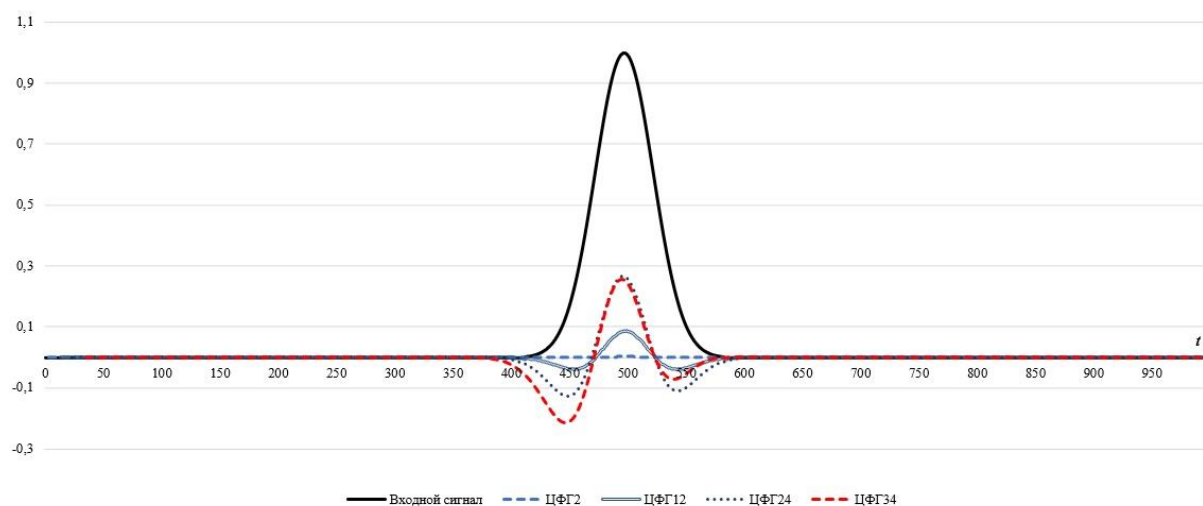


Рисунок 8. Входной сигнал (гауссовой формы) и восстановленный при помощи двойного преобразования Гильберта ЦФГ различных порядков

Figure 8. Input signal (Gaussian shape) and reconstructed using the double Hilbert transform of the CFG of various orders

Для треугольного сигнала, который имеет разрыв второй производной, результаты получились аналогичные гауссовой кривой, т. е.

восстановить исходный сигнал по амплитуде не удалось (рисунки 9 и 10).

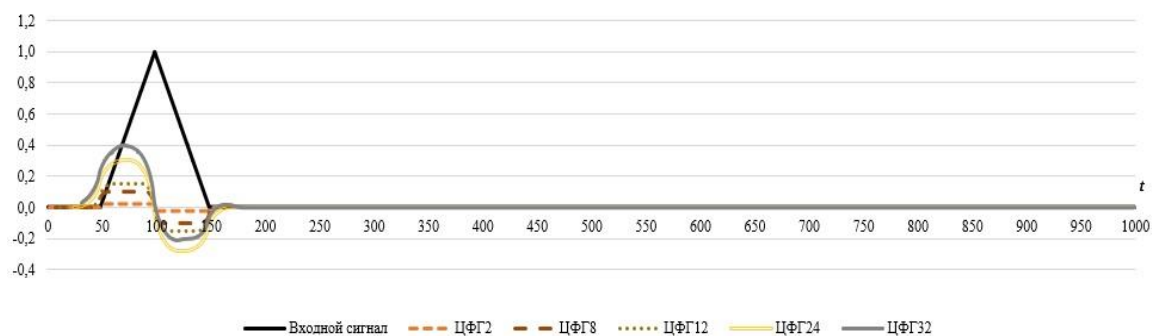


Рисунок 9. Входной сигнал (треугольный) и его преобразования Гильберта ЦФГ различных порядков

Figure 9. Input signal (triangular) and its Hilbert CFG transformations of various orders

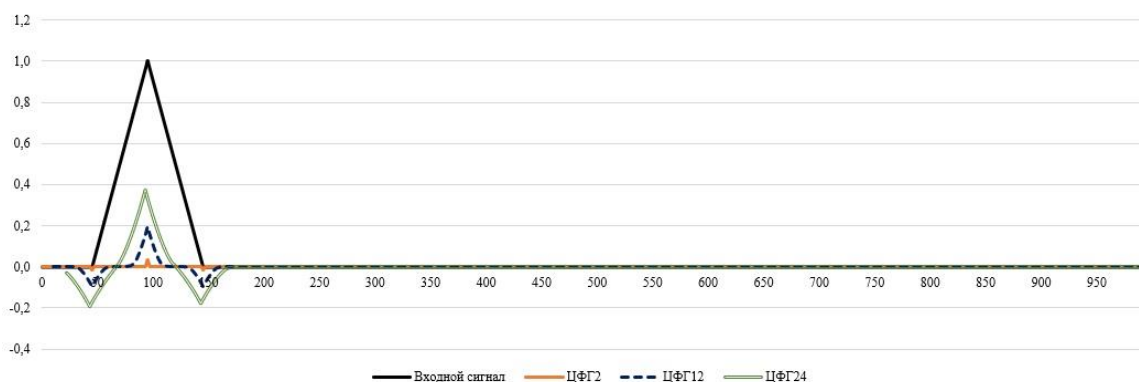


Рисунок 10. Входной сигнал (треугольный) и восстановленный при помощи двойного преобразования Гильберта ЦФГ различных порядков

Figure 10. The input signal (triangular) and reconstructed using the double Hilbert transform of the CFG of various orders

Третий критерий основан на влиянии длины фильтра на возможность распознавать сигналы схожей формы. Так как выбор порядка ЦФГ влияет на полученный Гильберт-образ, эксперименты были проведены для ЦФГ2 и ЦФГ24 (рисунки 11-14). Цифровой фильтр Гильберта 24-го порядка увеличивает эффект

Гиббса, однако сама форма хэш-образа при увеличении порядка фильтра меняется. При использовании ЦФГ2 разница в хэш-функциях мала, тем не менее, чтобы определить достаточно ли такой разницы для поиска различий в схожих сигналах или нет, необходимо было провести статистический анализ.

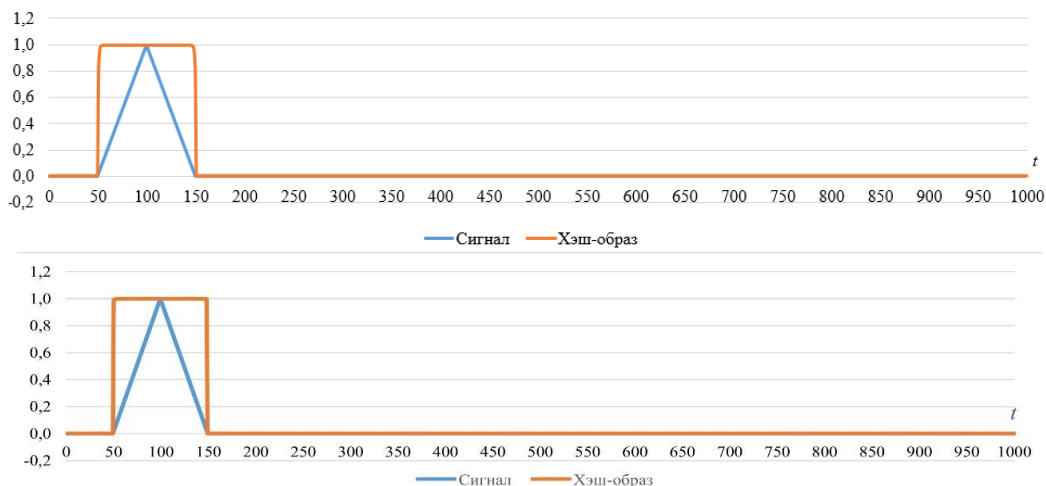


Рисунок 11. Треугольный сигнал и его хэш-образ, построенный с помощью ЦФГ2 (сверху) и ЦФГ24 (снизу)

Figure 11. The triangular signal and its hash image, constructed using CFG2 (top) and CFG24 (bottom)

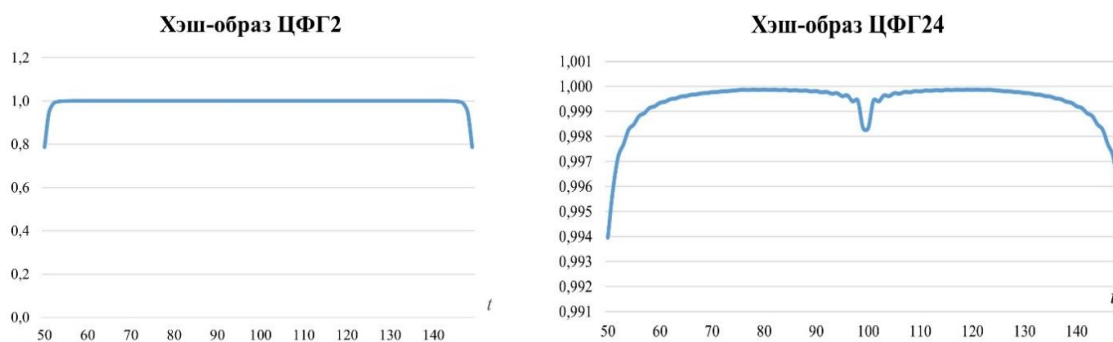


Рисунок 12. Увеличенные хэш-образы треугольного сигнала

Figure 12. Enlarged hash images of a triangular signal

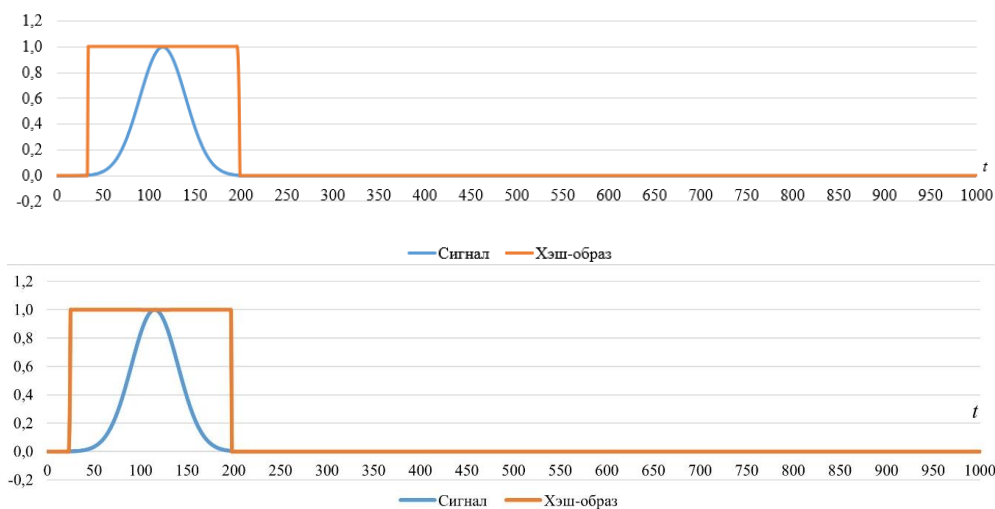


Рисунок 13. Сигнал гауссовой формы и его хэш-образ, построенный с помощью ЦФГ2 (сверху) и ЦФГ24 (снизу)

Figure 13. The Gaussian-shaped signal and its hash image, constructed using CFG2 (top) and CFG24 (bottom)

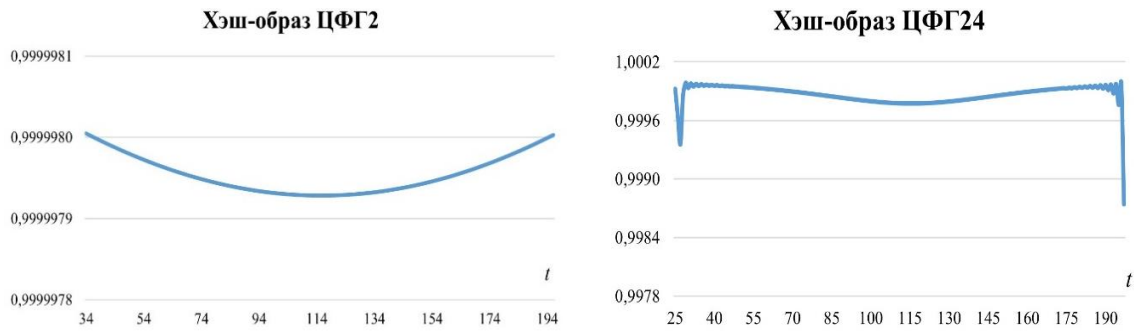


Рисунок 14. Увеличенные хэш-образы сигнала гауссовой формы

Figure 14. Enlarged hash images of a Gaussian-shaped signal

Для сравнения двух эмпирических распределений в качестве критерия был использован критерий типа Колмогорова – Смирнова. В этом критерии сравниваются накопленные частоты по разрядам, что позволяет определить точку, в которой сумма накопленных отклонений между двумя распределениями достигает максимума, а также определить значимость этого отклонения. Обозначим n_i – частота попаданий в промежуток, ω_i – относительная частота (т. е. $\omega_i = n_i/n$), v_i – накопленная частота. Чем больше разница между эмпирическим значением $\lambda_{\text{эмп}}$ и критическим значением ($\lambda_{\text{кр}}$)

критерия, тем более существенны различия (здесь $\lambda_{\text{эмп}} = \sup |v_{\text{тп}i} - v_{\text{г}i}|$).

Построенные гистограммы хэш-функций для сигналов с помощью ЦФГ2 представлены на рисунке 15. Следует заметить, что общее в гистограммах должно быть, так как сигналы схожие по форме, а значит, если убрать значения, при нормировке стремящиеся к 1, останутся значения, которые показывают, в чем отличия этих сигналов. Для их сравнения был проведен анализ Колмогорова-Смирнова. Рассчитанные значения представлены в таблице 1.

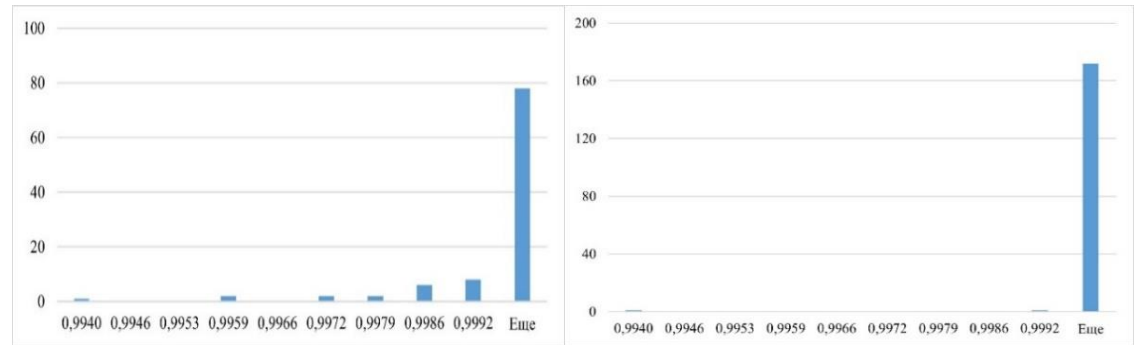


Рисунок 15. Хэш-образ треугольного (слева) сигнала и сигнала гауссовой формы (справа)

Figure 15. Hash image of a triangular (left) signal and a Gaussian-shaped signal (right)

Таблица 1. Накопленные частоты для разных импульсов

Table 1. Accumulated frequencies for different pulses

Интервалы значений хэш-образов / Hash image value ranges (H)	Треугольный / Triangular			Гауссов / Gaussian			Разница / Difference
	n_i	ω_i	v_i	n_i	ω_i	v_i	
≤ 0.9940	1	0.04	0.04	1	0.50	0.50	0.46
(0.9940; 0.9946]	0	0.00	0.04	0	0.00	0.50	0.46
(0.9946; 0.9953]	0	0.00	0.04	0	0.00	0.50	0.46
(0.9953; 0.9959]	2	0.08	0.12	0	0.00	0.50	0.38
(0.9959; 0.9966]	0	0.00	0.12	0	0.00	0.50	0.38
(0.9966; 0.9972]	2	0.08	0.20	0	0.00	0.50	0.30
(0.9972; 0.9979]	2	0.08	0.28	0	0.00	0.50	0.22
(0.9979; 0.9986]	8	0.32	0.60	0	0.00	0.50	0.10
> 0.9986	10	0.40	1.00	1	0.50	1.00	0.00
Σn_i	25		Σn_i	2		$\lambda_{\text{эмп}} =$	0.46
						$\lambda_{\text{кр}}(0,01) =$	0.40

С вероятностью ошибки 1% различия в сигналах статистически значимые.

Выводы

Выбор порядка ЦФГ зависит от решаемой задачи: для работ связанных с распознаванием сигналов достаточно выбрать короткий фильтр (ЦФГ2). Он позволяет найти различие между сигналами схожей формы. Однако, для построения ортогонального дополнения к сигналу стоит воспользоваться ЦФГ24, который

хорошо показывает себя в задачах, когда входной сигнал имеет форму синуса. Дальнейшего исследования требует работа с сигналами других форм. Необходимо исследовать возможность нахождения поправочного коэффициента для фильтра определенной длины, который не дает ошибку в смещении фаз.

Литература

1. Герасимова, В. И. Выделение инвариантных признаков сигналов с помощью преобразования Гильберта / В. И. Герасимова, А. Е. Краснов // Математика в современном мире : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 110-летию со дня рождения советского математика, доктора физико-математических наук, профессора П.П. Коровкина, Калуга, 12 апреля 2024 года. – Калуга: Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2024. – С. 42-49. – EDN YIHGZM.
2. Герасимова, В. И. Инвариантное распознавание сигналов / В. И. Герасимова // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Труды XVII Международной научно-технической конференции, Суздаль, 23–26 сентября 2024 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2024. – С. 32-36. – EDN GNRAXC.
3. Котов В. В. Использование гистограммных оценок в задачах распознавания. Успехи современного естествознания. – 2004. – № 4. – С. 40–42.
4. Краснов А.Е. Использование Гильберт-фильтрации электромагнитного сигнала для выделения инвариантных признаков его пространственной структуры. Автометрия. – 1987. – №5. – С. 102-103.
5. Матюнин Д.В., Жураковский В.Н., Силин С. И. Исследование ошибки преобразования фильтра Гильберта // Инновационная наука. – 2016. – №6–2.
6. Нуссенцвейг Х.М. Причинность и дисперсионные соотношения / Перевод с английского В. В. Малярова. М.: Мир, 1976. – 461 с.
7. Орлов А. И. Переход от сумм к интегралам и его применения в изучении асимптотических распределений статистик // Теория вероятностей и ее применения. – 1973. – Т.18. №4. – С. 881–883.
8. Huang N. E. Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
9. Kak S. Hilbert transformation for discrete data // International Journal of Electronics. 1973. Vol. 34. P. 177-183.
10. Koskivaara Olli. The Hilbert Transform / Mathematics course on Fourier analysis lectured in the winter of 2015 at the University of Jyväskylä by Esa Vesalainen. 2015. – 15 p.
11. Krasnov, A.E., Nikol'skii, D.N.: Formation of one-dimensional distributions of values of correlators of network traffic aggregates // Russ. Phys. J. 2020. № 63. P. 563–573.
12. Nikol'skii D.N., Krasnov A.E. Preparing Traffic to Analyze the Dynamics of Its States by Method of Partial Correlations. In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K.E., Kozyrev, D.V. (Eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2022. Communications in Computer and Information Science, vol 1748, pp. 269-281. Springer, Cham (2023).

References

1. Gerasimova, V. I. Invariant signal recognition / V. I. Gerasimova // Acousto-optical and radar methods of measurement and information processing: Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference, Suzdal, September 23-26, 2024. – Moscow: Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, 2024. – pp. 32-36. – EDN GNRAXC.
2. Gerasimova, V. I. Isolation of invariant signs of signals using the Hilbert transform / V. I. Gerasimova, A. E. Krasnov // Mathematics in the modern world : A collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of the Soviet mathematician, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor P.P. Korovkin, Kaluga, April 12, 2024. – Kaluga: Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky, 2024. – pp. 42-49. – EDN YIHGZM.

3. Huang N. E. Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
4. Kak S. Hilbert transformation for discrete data // International Journal of Electronics. 1973. Vol. 34. P. 177-183.
5. Koskivaara Olli. The Hilbert Transform / Mathematics course on Fourier analysis lectured in the winter of 2015 at the University of Jyväskylä by Esa Vesalainen. 2015. – 15 p.
6. Kotov V. V. The use of histogram estimates in recognition tasks. The successes of modern natural science. - 2004. – No. 4. – pp. 40-42.
7. Krasnov A.E. The use of Hilbert filtering of an electromagnetic signal to isolate invariant features of its spatial structure. Autometry. – 1987. – No.5. – pp. 102-103.
8. Krasnov, A.E., Nikol'skii, D.N.: Formation of one-dimensional distributions of values of correlators of network traffic aggregates // Russ. Phys. J. 2020. № 63. P. 563–573.
9. Matyunin D.V., Zhurakovskiy V.N., Silin S. I. Investigation of the Hilbert filter conversion error // Innovative science. - 2016. – No.6-2.
10. Nikol'skii D.N., Krasnov A.E. Preparing Traffic to Analyze the Dynamics of Its States by Method of Partial Correlations. In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K.E., Kozyrev, D.V. (Eds) Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2022. Communications in Computer and Information Science, vol 1748, pp. 269-281. Springer, Cham (2023).
11. Nussenzweig H.M. Causality and dispersion relations / Translated from English by V. V. Mal'yarova. M.: Mir, 1976. – 461 p.
12. Orlov A. I. The transition from sums to integrals and its application in the study of asymptotic distributions of statistics // Probability theory and its applications. - 1973. – vol.18. No.4. – pp. 881-883.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Герасимова Виктория Игоревна	аспирант, Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского, старший преподаватель кафедры физики и математики, gerasimowa.victoria@yandex.ru SPIN-код: 7789-8950

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Gerasimova Victoria Igorevna	postgraduate student, Kaluga State University named after K. E. Tsiolkovsky, Senior Lecturer at the Department of Physics and Mathematics, gerasimowa.victoria@yandex.ru SPIN-code: 7789-8950

статья поступила в редакцию 20.01.2025	одобрена после рецензирования 11.02.2025	принята к публикации 28.02.2025
the article was submitted 20.01.2025	approved after reviewing 11.02.2025	accepted for publication 28.02.2025

ПОВЕДЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ТОЧКИ КАК ИНДИКАТОР ПОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РЯДА

Михаил Григорьевич Матвеев¹ mgmatveev@yandex.ru
Евгений Викторович Рудаков¹ evgenur@yandex.ru

¹Воронежский государственный университет, Университетская площадь, 1, Воронеж, 394018, Россия

Аннотация. Рассматривается задача экспериментального подтверждения того, что ряд стационарных точек, вычисленных на основе исходного временного ряда с помощью применения дискретной цепи Маркова с нечеткими состояниями, может являться индикатором поведения этого временного ряда и как следствие индикатором разладки в нем.

Ключевые слова: временной ряд, структурные разрывы, разладка во временном ряду, случайный шум, авторегрессия первого порядка, нечеткое состояние, дискретная цепь Маркова, стационарная точка, скользящее среднее, корреляция, коэффициент Пирсона.

Для цитирования: Матвеев М. Г., Рудаков Е. В. Поведение стационарной точки как индикатор поведения временного ряда // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 71-78.

Original article

STATIONARY POINT BEHAVIOR AS AN INDICATOR OF TIME SERIES BEHAVIOR

Mikhail G. Matveev¹ mgmatveev@yandex.ru
Evgeniy V. Rudakov¹ evgenur@yandex.ru

¹Voronezh state university, University sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

Annotation. The article discusses a problem of experimental confirmation that a series of stationary points calculated on the basis of the original time series using a discrete Markov chain with fuzzy states can be an indicator of the behavior of this time series and, as a consequence, an indicator of disorder in it.

Keywords: time series, structural breaks, disorder in the time series, random noise, first order auto regression, fuzzy state, discrete Markov chain, stationary point, moving average, correlation, Pearson coefficient.

For citation: Matveev M. G., Rudakov E. V. Stationary point behavior as an indicator of time series behavior. *Ingenierne tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 71-78. (In Russ.).

Введение

Анализ временных рядов – совокупность математико-статистических методов анализа, предназначенных для выявления структуры временных рядов и для их прогнозирования. Целью анализа является выявление закономерностей изучаемых процессов, построение моделей для прогноза, контроль и управление динамикой развития процесса, выработка сигналов, предупреждающих о нежелательных последствиях [1].

Большинство разработанных методов анализа временных рядов основано на предположении постоянства изучаемого процесса в интервале наблюдения. Однако в реальных системах под воздействием внешней среды и времени закономерности процесса могут изменяться. Такие изменения обычно называются структурными разрывами и отражаются в изменениях коэффициентов параметрической модели процесса и / или параметров распределения случайной составляющей [2]. Соответствующие изменения во временном ряду

наблюдений, описывающем изучаемый процесс, принято называть моментами разладки временного ряда [3, 4].

Алгоритмам выделения моментов разладки временных рядов уделяется большое внимание аналитиков в виду следующих причин [2]:

- изменяется параметрическая модель системы; если изменения в параметрах модели игнорируются, то оценки параметров становятся незначимыми и прогнозы теряют точность;
- усложняется процедура проверки критериев, предназначенных для определения типа процесса;
- усложняется процедура проверки наличия коинтеграций.

Решения задач обнаружения структурных разрывов и соответствующих им моментов разладки временного ряда могут быть построены на апостериорных процедурах, направленных на обнаружения структурных изменений, после того как наблюдения над процессом закончены, и на процедурах в режиме реального времени,

обнаруживающих изменения в темпе получения текущих наблюдений [2].

Апостериорные методы подразделяются на:

1) алгоритмы, работающие в условиях отсутствия предположений о модели процесса, например, критерий Колмогорова-Смирнова [5];

2) алгоритмы, использующие данные о известном до момента изменения распределении, например критерии согласия χ -квадрат, Колмогорова-Смирнова [5, 6];

3) алгоритмы, базирующиеся, на предположении, что ряд описывается регрессионной или авторегрессионной моделью:

- проверка на изменение коэффициентов регрессии с использованием F -статистик [7, 8, 9];

- определение границ интервала однородности, на котором модель процесса можно считать постоянной [10, 11];

- проверка на наличие обобщенных изменений, основанная на анализе остатков (CUSUM и MOSUM тесты) [12, 13].

Для обнаружения изменения свойств процесса по текущим наблюдениям в режиме реального времени применяются методы последовательного анализа [14, 15], в основе которых в большинстве случаев лежит процедура последовательной проверки гипотез о плотности распределения процесса.

В данной работе рассматривается альтернативный подход [16, 18, 19] для обнаружения изменения свойств процесса и поиска моментов разладки временного ряда, основанный на переходе из исходного пространства наблюдаемых числовых переменных в другое пространство, с более удобными свойствами для решения задачи обнаружения структурных разрывов. В качестве такого пространства выбирается пространство нечетких состояний системы, образующее временной ряд нечетких категориальных переменных. При таком подходе можно предложить новые методы оценки разладки временных рядов.

Одним из таких методов может являться применение нечетких цепей Маркова [16-19]. Основные этапы алгоритма, лежащего в основе этого метода, описываются следующим образом. Динамика процесса наблюдается в виде числового временного ряда в моменты времени $t = 0, 1, 2, \dots$ и классифицируется в одно из n нечетких состояний. По этим состояниям строится цепь Маркова. В каждый дискретный момент времени для соответствующей переходной матрицы цепи рассчитывается вектор π_t , описывающий распределение вероятностей нечет-

ких состояний системы в этот момент времени. Образующаяся при этом последовательность рассчитанных векторов, которую в дальнейшем будем называть рядом стационарных точек, может использоваться как индикатор поведения исходного временного ряда. В предлагаемом исследовании ставится задача экспериментального подтверждения этого утверждения на примере модели временного ряда, описываемой уравнением авторегрессии первого порядка со структурными разрывами в виде изменения параметров авторегрессии в заданные моменты времени, для упрощенной системы с двумя нечеткими состояниями.

Материал и методы исследования

Нечетким состоянием A системы или рассматриваемого процесса, описываемого временным рядом, будем называть нечеткое множество A , представляющее собой совокупность пар, составленных из значений элементов x временного ряда x_t и соответствующих степеней принадлежности $\mu_A(x)$, задаваемых функциями принадлежности.

Уравнение дискретной цепи Маркова с нечеткими состояниями в матричном виде записывается следующим образом:

$$p_{t+1} = M^T p_t, t = 0; 1; 2; \dots; p_0 = (1; 0; \dots; 0), \quad (1)$$

где t - дискретное время; $p_t = (p_{A_1}; \dots; p_{A_n})^T$ - вектор, задающий распределение вероятностей нечетких состояний в момент времени t ; n - число нечетких состояний; $M = \|p_{ij}\|$ - стохастическая переходная матрица размера $n \times n$ с элементами p_{ij} , представляющими вероятности перехода системы из нечеткого состояния i в нечеткое состояние j . Матрица M называется однородной, так же как и цепь Маркова в этом случае, если переходные вероятности не зависят от времени.

Однородная цепь Маркова описывает динамику изменения распределения вероятностей нечетких состояний p_{A_t} . При $t \rightarrow \infty$ вектор p_t становится стационарным распределением, которое обычно обозначают как вектор π . Стационарное распределение может быть единственным при выполнении условия неразложимости матрицы M . В вероятностном пространстве стационарное распределение образует стационарную (неподвижную) точку отображения M . Это обеспечивает однозначное со-

ответствие между значениями матрицы M и координатами стационарной точки π . Как будет показано экспериментальным путем ниже, поведение стационарной точки, вычисленной на основе исходного временного ряда, может служить индикатором поведения этого ряда и, как следствие, индикатором разладки в нем.

При заданной матрице M координаты стационарной точки π можно получить как решение системы однородных уравнений:

$$\pi = M^T \pi. \quad (2)$$

Для получения нетривиального решения одно из уравнений (2) следует заменить на

$$\text{уравнение } \sum_{i=1}^n p_{Ait} = \sum_{i=1}^n \pi_i = 1.$$

Моменту разладки соответствует изменение элементов матрицы M , но априори матрица M неизвестна, а изменение ее элементов не наблюдаемо. Следовательно, для расчёта стационарной точки и определения моментов разладки надо уметь идентифицировать переходную матрицу в режиме реального времени.

Одним из подходов для определения переходной матрицы, применяемых на практике и подробно описанном в работах [16-19], является алгоритм рекуррентной статистической оценки, в котором при поступлении нового значения временного ряда происходит пересчет переходных вероятностей матрицы M в соответствии со следующей формулой:

$$M = \frac{1}{d} \sum_{t=1}^d M^t = \frac{1}{d} \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^d \mu_{11}^t & \sum_{t=1}^d \mu_{12}^t \\ \sum_{t=1}^d \mu_{21}^t & \sum_{t=1}^d \mu_{22}^t \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где вес $\frac{1}{d} = p_{ij}^t$ - статистическая оценка вероятности случайного нечеткого события перехода из нечеткого состояния i в нечеткое состояние j в момент времени t , μ_{ij}^t - значения функций принадлежности случайных нечетких событий переходов из состояния i в состояние j , d - момент времени, при котором можно считать, что набранная статистика переходов репрезентативна.

Для каждой матрицы M , вычисленной на соответствующем шаге, путем решения системы уравнений (2) рассчитывается соответствующий вектор $\pi_t = (p_1, p_2)_t = (p_1, 1 - p_1)_t$. Здесь для упрощения показан вектор, который имеет две составляющие для случая двух нечетких состояний системы. Образующуюся последовательность π_t будем называть рядом ста-

ционарных точек, вычисленным на основе исходного временного ряда. Дополнительно введем понятие однородного сегмента для ряда стационарных точек. Участок ряда $[\pi_k; \pi_{k+d})$ будем называть однородным сегментом, если для заданного малого порога нарушения однородности $\Delta > 0$ и любого $t \in [k; k+d)$ выполняется условие $|MA - p_{1t}| \leq \Delta$, где MA (moving average) – скользящее среднее значений первой компоненты p_{1t} стационарной точки π_t в момент времени t с заданной длиной окна w , рассчитанное на начальном участке рассматриваемого сегмента $[\pi_k; \pi_{k+w}] \in [\pi_k; \pi_{k+d})$. После окончания очередного однородного сегмента в момент времени t_s построение цепи Маркова, а так же переходной матрицы M и соответственно расчёт следующего значения стационарной точки осуществляется заново со значений временного ряда $x_{t_s}, x_{t_s+1}, \dots$. Можно считать, что в пределах однородного сегмента процесс изменения состояния так же практически однороден и соответствует переходному процессу цепи Маркова $P_{t+1} = M^T P_t$ с однородной матрицей M .

Далее покажем экспериментально, что ряд стационарных точек, вычисленных на основе исходного временного ряда, может являться индикатором его поведения и, как следствие, индикатором разладки в нем.

Рассмотрим временной ряда, задаваемый моделью авторегрессии первого порядка $x_t = ax_{t-1} + b + \varepsilon_t$ со следующими фиксированными начальными коэффициентами $x_t = 0,99x_{t-1} + 6 + \varepsilon_t$. Случайный шум ε_t имеет нормальное распределение с математическим ожиданием $M[\varepsilon_t] = 0$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma[\varepsilon_t] = 3$.

Для моделирования разладки в заданном временном ряду будем изменять коэффициент a в определенные моменты времени (моменты разладки). Введем, например, следующие четыре точки разладки:

- 1) $t_1 = 400, a = 0,9$;
- 2) $t_2 = 800, a = 0,97$;
- 3) $t_3 = 1200, a = 0,85$;
- 4) $t_4 = 1600, a = 0,98$.

График значений получившегося временного ряда при начальном значении ряда $x_0 = 1000$ можно увидеть на рисунке 1. На графике четко видны точки разладки, когда поведение временного ряда меняется из-за изменений коэффициента a .



Рисунок 1. График значений временного ряда, задаваемого моделью авторегрессии первого порядка с изменяющимся коэффициентом a в моменты времени $t_1 = 400$, $t_2 = 800$, $t_3 = 1200$, $t_4 = 1600$

Figure 1. Graph of the values of the time series set by the first-order autoregression model with a changing coefficient a at time points $t_1 = 400$, $t_2 = 800$, $t_3 = 1200$, $t_4 = 1600$

Проведем расчет стационарных точек для модели временного ряда с изменяющимися коэффициентами, рассмотренной в предыдущем разделе, на основе методики применения цепей Маркова для нечетких состояний [16, 18, 19].

Отметим, что для построения цепи Маркова будем рассматривать 2 нечетких состояния A_1 и A_2 , с функциями принадлежности μ для значений исходного временного ряда, изображёнными в виде пересекающихся прямых на рисунке 2, где $x_0 = 1000$, $a = 0,99$ (максимальное значение коэффициента), $b = 6$, $\sigma = 3$ по условиям рассматриваемой модели временного ряда.

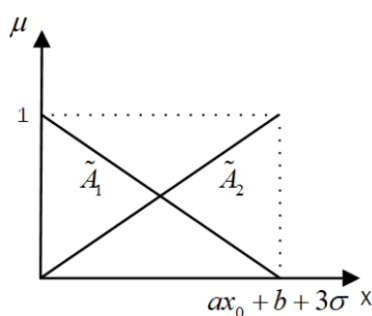


Рисунок 2. График функций принадлежности двух нечетких состояний для значений исходного временного ряда

Figure 2. Graph of membership functions of two fuzzy states for the values of the initial time series

Вычислим ряд стационарных точек. При определении переходной матрицы будем использовать рекуррентный статистический подход согласно методике, описанной в предыдущем разделе данной работы.

На рисунке 3 представлен график значений первой компоненты p_{1t} ряда стационарных точек π_t и однородные сегменты этого ряда. При расчёте были заданы следующие значения:

- порог нарушения однородности сегмента $\Delta = 0,11$;
- минимальная длина однородного сегмента, при равенстве или превышении которой сегменте ряда рассматривался как однородный, выбиралась равной длине окна скользящего среднего $w = 8$.

Как можно заметить, представленный график очень похож на график исходного временного ряда если его зеркально отразить по вертикали.

Далее, чтобы показать, что построенный ряд стационарных точек может выступать в качестве индикатора поведения исходного временного ряда, рассмотрим, как они коррелируют между собой.

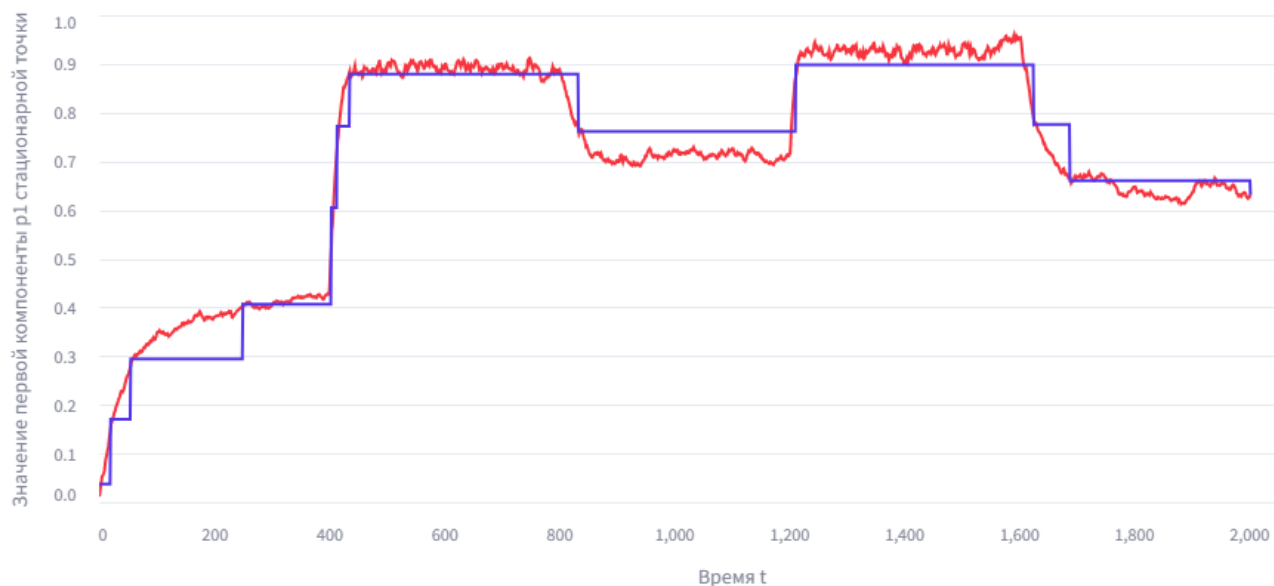


Рисунок 3. График значений первой компоненты p_{1t} (красная линия) ряда стационарных точек π_t и однородные сегменты этого ряда (синяя линия)

Figure 3. Graph of the values of the first component p_{1t} (red line) of a series of stationary points π_t and homogeneous segments of this series (blue line)

Результаты исследования и их обсуждение

Построим диаграмму рассеяния чтобы визуально оценить корреляцию между значениями исходного временного ряда и значениями первой компоненты ряда стационарных точек (рисунок 4).

Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что между значениями двух рядов есть сильная отрицательная корреляция, т.е.

с уменьшением значений исходного временного ряда значения первой компоненты p_{1t} ряда стационарных точек π_t растут. При этом поскольку вторая компонента p_{2t} ряда стационарных точек π_t рассчитывается как $1 - p_{1t}$, то очевидно что случае p_{2t} и исходного временного ряда корреляция будет сильной положительной.

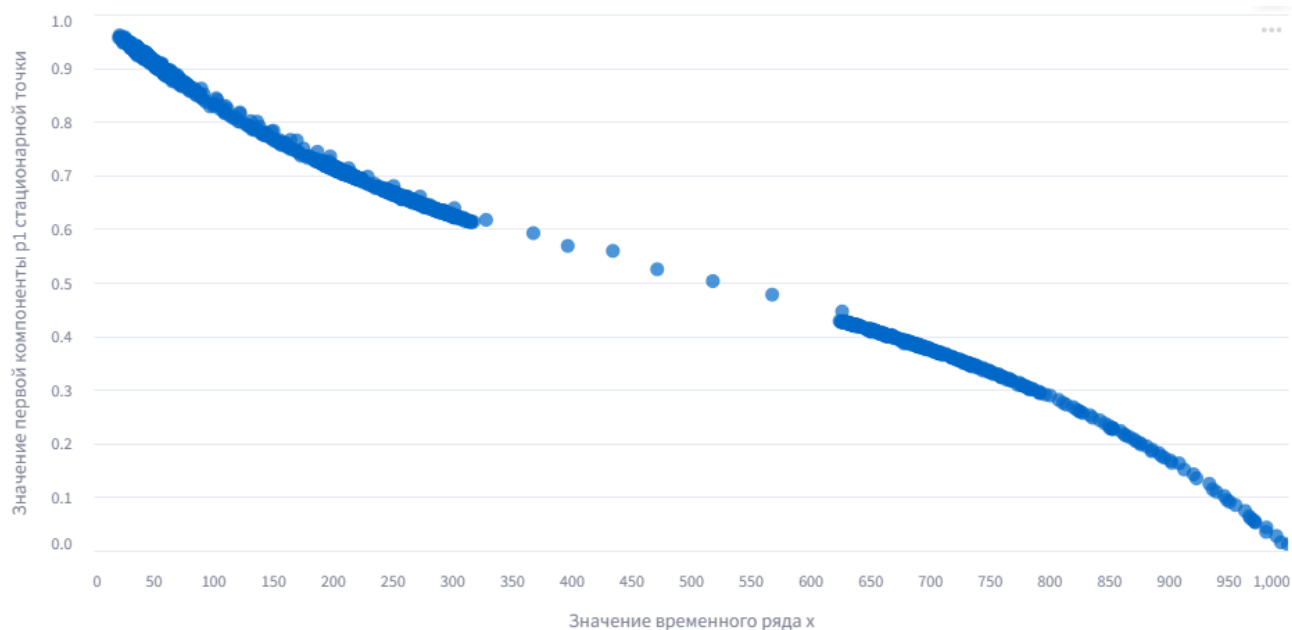


Рисунок 4. Диаграмма рассеяния значений первой компоненты p_{1t} ряда стационарных точек π_t относительно значений исходного временного ряда x_t

Figure 4. The scattering diagram of the values of the first component p_{1t} of a series of stationary points π_t relative to the values of the initial time series x_t

Исходя из полученного графика можно сделать вывод, что между значениями двух рядов есть сильная отрицательная корреляция, т.е. с уменьшением значений исходного временного ряда значения первой компоненты p_{1t} ряда стационарных точек π_t растут. При этом поскольку вторая компонента p_{2t} ряда стационарных точек π_t рассчитывается как $1 - p_{1t}$, то очевидно что случае p_{2t} и исходного временного ряда корреляция будет сильной положительной.

Для математического подкрепления отмеченной визуальной корреляции можно рассчитать коэффициент Пирсона, который представляет собой безразмерный индекс, изменяющийся в интервале $[-1;1]$ и отражающий степень линейной зависимости между двумя множествами данных. Формула расчёта коэффициента корреляции Пирсона для выборок и с учетом введенных обозначений будет выглядеть следующим образом:

$$r_{xp_1} = \frac{\sum_{t=0}^n (x_t - \bar{x})(p_{1t} - \bar{p}_1)}{\sqrt{\sum_{t=0}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=0}^n (p_{1t} - \bar{p}_1)^2}} \quad (4)$$

где x_t, p_{1t} - соответствующие значения исходного временного ряда и первой компоненты ряда стационарных точек в моменты времени t , n - размер выборки (2000 элементов в нашем случае), $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t$ - выборочное сред-

нее значений исходного временного ряда (аналогично для $\bar{p}_1$).

С использованием этой формулы рассчитанное значение коэффициента Пирсона для исходного временного ряда и ряда первых компонент стационарных точек равно $r_{xp_1} = -0,985$, что показывает сильную отрицательную корреляцию и соответствует диаграмме рассеяния, изображенной на рисунке 4.

Выводы

В работе экспериментальным путем на примере временного ряда, задаваемого моделью авторегрессии первого порядка со случайным нормально распределенным шумом, а так же со структурными изменениями моделируемыми изменениями коэффициентов авторегрессии в заданные моменты времени, было показано что ряд стационарных точек, построенный на основе исходного временного ряда, с помощью применения цепи Маркова с нечеткими состояниями может являться индикатором его поведения и как следствие индикатором разладки в нем. Введённое понятие однородных сегментов ряда стационарных точек позволяет выполнять краткосрочное прогнозирование поведения рассматриваемого процесса, описываемого исходным временным рядом, а так же может использоваться для контроля и управление динамикой развития процесса и выработки сигналов, предупреждающих о нежелательных последствиях.

Литература

1. Мишулина О. А. Статистический анализ и обработка временных рядов. М.: МИФИ, 2004.
2. Гребенюк Е.А. Методы анализа нестационарных временных рядов с неявными изменениями свойств // Автоматика и телемеханика. 2005. № 12. С. 3–30.
3. Perron P. Further Evidence on Breaking Trend Functions in Macroeconomic Variables // Journal of Econometrics. 1997. V.80. P. 355–385.
4. Канторович Г.Г. Лекции: Анализ временных рядов // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2002. Т. 6. № 3. С. 379–401.
5. Боровков А.А. Математическая статистика. М.: Наука, 1984.
6. Уилкс С. Математическая статистика. М.: Наука, 1967.
7. Chow G.C. A comparison of the information and posterior probability criteria for model selection // J. Econom. 1981. V. 16. P. 21-33.
8. Andrews D.W.K. Tests for Parameter Instability and Structural Change with Unknown Change Point // Econometria. 1993. V. 61. P. 821-856.
9. Hansen B.E. Approximate asymptotic p values for structural-change tests // J. Business & Econom. Statist. 1997. V. 15. P. 60-67.
10. Andrews D.W.K., Ploberger W. Optimal Tests When a Nuisance Parameter is Present Only Under the Alternative // Econometria. 1994. V. 62. P. 1383-1414.

11. Bai J., Perron P. Estimating and Testing Linear Models With Multipal Structural Changes // *Econometria*. 1998. V. 66. P. 47-78.
12. Chong T.T.L. Partial Parameter Consistency in a Misspecified Structural Change Model // *Econom. Lett.* 1995. V. 49. P. 351-357.
13. Lepski O., Spokoiny V. Optimal pointwise adaptive methods in nonparametric estimation // *Ann. Statist.* 1997. V. 25. P. 2512-2546.
14. Chu C.S.j., Stinchcombe M., White H. Monitoring structural change // *Econometria*. 1996. V. 64. P. 1045-1065.
15. Вальд А. Последовательный анализ. М.: ФМ, 1960.
16. Матвеев М.Г., Алейникова Н.А., Громковский А.А. Дискретная однородная цепь Маркова для нечетких состояний // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2022. № 4. С. 119–131.
17. Pardo M. J., Fuente D. Design of a fuzzy finite capacity queuing model based on the degree of customer satisfaction: Analysis and fuzzy optimization // *Fuzzy Sets and Systems*. 2008. V. 159. P. 3313–3332.
18. Matveev M., Korotkov V. Fuzzy Risk States Assessment Using Markov Chains // *Communications in Computer and Information Science*. Springer, 2023. V. 1767. P. 15–26.
19. Матвеев М.Г., Сирота Е.А. Разработка и исследование статистических моделей нестационарного многомерного временного ряда атмосферных температур в условиях неоднородности // *Информационные технологии*. 2014. № 12 С. 20–24.

References

1. Mishulina O.A. Statistical analysis and processing of time series – М.: MIFI, 2004.
2. Grebenyuk E. A. Methods for analyzing non-stationary time series with implicit changes in properties // *Automation and telemechanics*. - 2005. № 12. P. 3–30.
3. Perron P. Further Evidence on Breaking Trend Functions in Macroeconomic Variables // *Journal of Econometrics*. - 1997. V.80. P. 355–385.
4. Kantorovich G. G. Lectures: Time series analysis // *Economic Journal of the Higher School of Economics*, vol. 6. – 2002. № 3. P. 379–401 (in Russian).
5. Borovkov A. A. Mathematical statistics. - М.: Science, 1984.
6. Uilks S. Mathematical statistics. - М.: Science, 1967.
7. Chow G.C. A comparison of the information and posterior probability criteria for model selection // *J. Econom.* - 1981. V. 16. P. 21-33.
8. Andrews D.W.K. Tests for Parameter Instability and Structural Change with Unknown Change Point // *Econometria*. - 1993. V. 61. P. 821-856.
9. Hansen B.E. Approximate asymptotic p values for structural-change tests // *J. Business & Econom. Statist.* - 1997. V. 15. P. 60-67.
10. Andrews D.W.K., Ploberger W. Optimal Tests When a Nuisance Parameter is Present Only Under the Alternative // *Econometria*. - 1994. V. 62. P. 1383-1414.
11. Bai J., Perron P. Estimating and Testing Linear Models With Multipal Structural Changes // *Econometria*. - 1998. V. 66. P. 47-78.
12. Chong T.T.L. Partial Parameter Consistency in a Misspecified Structural Change Model // *Econom. Lett.* - 1995. V. 49. P. 351-357.
13. Lepski O., Spokoiny V. Optimal pointwise adaptive methods in nonparametric estimation // *Ann. Statist.* - 1997. V. 25. P. 2512-2546.
14. Chu C.S.j., Stinchcombe M., White H. Monitoring structural change // *Econometria*. - 1996. V. 64. P. 1045-1065.
15. Vald A. Sequential Analysis - М.: FM, 1960.
16. Matveev M.G., Aleynikova N.A., Gromkovsky A.A. Discrete homogeneous Markov chain for fuzzy states. VSU Bulletin. Series: System analysis and information technologies. – 2022. № 4. P. 119–131 (in Russian).
17. Pardo M. J., Fuente D. Design of a fuzzy finite capacity queuing model based on the degree of customer satisfaction: Analysis and fuzzy optimization // *Fuzzy Sets and Systems*. - 2008. V. 159. P. 3313–3332.

18. Matveev M.G., Korotkov V. Fuzzy Risk States Assessment Using Markov Chains // *Communications in Computer and Information Science*. Springer. - 2023. V. 1767. P. 15–26.

19. Matveev M.G., Sirota E.A. Development and research of statistical models of non-stationary multidimensional time series of atmospheric temperatures under conditions of heterogeneity // *Information Technologies*. – 2014. № 12. P. 20–24 (in Russian).

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Матвеев Михаил Григорьевич	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», заведующий кафедрой «Информационные технологии управления», mgmatveev@yandex.ru ORCID: 0000-0002-6528-6420
Рудаков Евгений Викторович	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», аспирант кафедры «Информационные технологии управления», evgenur@yandex.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Matveev Mikhail Grigorievich	Dr. Sci. (Techn.), professor, Voronezh State University, head of the department of Management Information Technologies, mgmatveev@yandex.ru ORCID: 0000-0002-6528-6420
Rudakov Evgeniy Victorovich	Voronezh State University, postgraduate of the department of Management Information Technologies, evgenur@yandex.ru

статья поступила в редакцию 24.01.2025	одобрена после рецензирования 12.02.2025	принята к публикации 28.02.2025
the article was submitted 24.01.2025	approved after reviewing 12.02.2025	accepted for publication 28.02.2025

ПРИМЕНЕНИЕ ИТ-РЕШЕНИЙ ДЛЯ КАРЬЕРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Сергей Алексеевич Клоков[✉] ¹ se.klokov@gmail.com
 Анна Алексеевна Бирюкова ¹ biryukova@mirea.ru

¹МИРЭА - Российский технологический университет, пр-кт Вернадского, д.78, Москва, 119454, Россия

Аннотация. В условиях стремительного прогресса информационных технологий цифровизация и автоматизация становятся ключевыми факторами инновационного роста. Для оптимизации отрасли необходимо решать дефицит квалифицированных ИТ-кадров, повышая их компетенции и модернизируя образовательные программы. Несмотря на многочисленные исследования, посвящённые анализу рынка труда и несоответствию квалификаций выпускников запросам работодателей, вопросы самообучения остаются недостаточно изученными. Авторы анализируют причины разрыва между образовательными программами и потребностями рынка труда, проводят анкетирование студентов и специалистов, подтверждающее этот разрыв. Проведён анализ систем карьерного планирования, определены их преимущества и недостатки, сформирована их типология. На основе результатов обоснована необходимость нового подхода, объединяющего рекомендации, аналитику рынка труда и прогнозирование его изменений. Предлагается авторская система (ИТ-решение), для которой сформулированы требования к системе карьерного планирования, спроектированы диаграммы компонентов и процессов, рассмотрен автоматизированный процесс сбора и аналитики данных для составления дорожных карт, показан пример формирования карты.

Ключевые слова: информационные технологии, образование, рынок труда, карьерное планирование, рекомендательные системы, компетенции, навыки, большие данные, прогнозирование, анализ вакансий.

Для цитирования: Клоков С. А., Бирюкова А. А. Применение ИТ-решений для карьерного планирования // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 79-88.

Original article

APPLICATION OF IT SOLUTIONS FOR CAREER PLANNING

Sergey A. Klokov[✉] ¹ se.klokov@gmail.com
 Anna A. Biryukova ¹ biryukova@mirea.ru

¹MIREA - Russian Technological University, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454, Russia

Abstract. In the context of the rapid progress of information technology, digitalization and automation are becoming key factors of innovative growth. To optimize the industry, it is necessary to solve the shortage of qualified IT personnel by increasing their competencies and modernizing educational programs. Despite numerous studies devoted to the analysis of the labor market and the discrepancy between the qualifications of graduates and the demands of employers, the issues of self-study remain insufficiently studied. The authors analyze the reasons for the gap between educational programs and the needs of the labor market, conduct a survey of students and specialists confirming this gap. The analysis of career planning systems has been carried out, their advantages and disadvantages have been identified, and their typology has been formed. Based on the results, the necessity of a new approach combining recommendations, labor market analytics and forecasting of its changes is substantiated. An author's system (IT solution) is proposed, for which the requirements for a career planning system are formulated, diagrams of components and processes are designed, an automated process for collecting and analyzing data for making road maps is considered, and an example of map formation is shown.

Keywords: information technology, education, labor market, career planning, recommendation systems, competencies, skills, big data, forecasting, job analysis.

For citation: Klokov S. A., Biryukova A. A. Application of it solutions for career planning. Ingenernyye tehnologii = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 79-88. (In Russ.).

Введение

В современных условиях интенсивного развития информационных технологий (ИТ) сфера карьерного планирования становится важным фактором инновационного роста государства, в связи с чем возникает необходимость оптимизации существующих алгоритмов кадрового планирования.

Среди основных приоритетов и тенденций развития высшего образования Аветисян

П.С., Заславская М.И., Титаренко Л.Г. и другие в монографии, посвященной высшему образованию в государствах-членах Евразийского Экономического Союза [1], отмечают персонализированное образование, индивидуальные образовательные траектории, предлагают этапы построения данных процессов. В работе Ахмедова З.К.о [2] также изучаются варианты оптимизации, дается характеристика этапов для стратегических изменений структуры

управления кадровым планированием, подчеркивается необходимость преобразований для повышения качества человеческих ресурсов. Преобразования ИТ-отрасли, приводят к трансформации традиционных секторов экономики, к изменению требований к профессиям, возрастает зависимость предприятий от ИТ-специалистов. В ответ на высокую потребность в квалифицированных специалистах в разнообразных областях, где имеет место процесс автоматизации, цифровой трансформации, возникает устойчивая тенденция к повышению численности студентов, выбирающих специализации, связанные с информационными технологиями, что подтверждают результаты статистических исследований в высших учебных заведениях. Также происходит преобразование образовательных учреждений, и в рамках четвертой промышленной революции внедряется модель «университета 4.0», что рассмотрено в работах белорусских исследователей Жука О.Л. [3] и Лозицкого В.Л. [4]

Несмотря на преобразования, отечественный рынок труда испытывает нехватку квалифицированных кадров в сфере ИТ. По данным Министерства цифрового развития дефицит составляет от 500 до 700 тысяч человек. Для устранения разрыва Правительство РФ планирует направить более 27 миллиардов рублей на реализацию национальной программы «Цифровая экономика» и нового федерального проекта «Развитие кадрового потенциала ИТ-отрасли». Тем не менее, в связи с быстрым развитием ИТ-сферы, российские (такие как «Регистр профессиональных стандартов») и международные (такие как SFIA) профессиональные стандарты не успевают адаптироваться к тенденциям, так как разработка стандартов проходит длительный процесс согласования, что отмечено в работе Сухомлина В.А. [5], поэтому существует необходимость автоматизации процесса определения востребованных компетенций, с целью оптимизации карьерного планирования специалистов в области ИТ. Неотъемлемой частью процесса является мониторинг, обработка и систематизация требований, предъявляемых работодателями на различных веб-ресурсах, которые используются для разработки рабочих программ учебных дисциплин в учебных заведениях, чтобы обеспечить подготовку специалистов, чьи навыки будут востребованы на рынке труда.

Существуют исследования, посвященные процессу карьерного планирования специалистов. В работах, таких исследователей, как Калевко В. В., Лагерева Д. Г. Подвесовский А.

Г. [6], Булах К. В., Бурцева Е. Т. [7], предлагается проводить анализ рынка труда в области информационных технологий, используя информацию о вакансиях, доступных на веб-платформах для поиска работы. На основе анализа планируется разрабатывать образовательные программы, которые будут адаптированы к потребностям учащихся, а также вовлекать в процесс обучения работодателей и обучающихся, так как недостаточное внимание к планированию профессионального развития приводит к трудностям при вхождении в профессию, что отмечено в статье Ковалевич М.С. и Леонюк Н.А. [8]. Исследования, направленные на разработку модели специалиста, которые учитывают Федеральный государственный образовательный стандарт (ФГОС), требования образовательных учреждений и профессиональные стандарты, были проведены Захаровой А. А. [9], Т. Ф., Муравьевым С. А. [10]. Концепции подготовки специалистов, учитывающие как потребности работодателей, так и цели образовательных учреждений, были подробно рассмотрены в работах Марвана Х. [11]. Методы автоматизации сбора данных и оптимизации процессов подробно изучены и описаны в исследованиях Смита Д., Али А. [12] и Ильина Д. Ю. [13]. В исследованиях, посвященных созданию модели для оценки компетенций специалистов, рассматривается возможность учета требований, но не всегда исследователи подходят к этой задаче с точки зрения автоматизации, что ограничивает количество источников данных, которые можно использовать для построения такой модели. Кроме того, исходные данные о требованиях работодателей не унифицированы, что указывает на необходимость разработки моделей и методов обработки данных о требованиях предприятий к кандидатам.

Цель данной работы заключается в предложении авторской системы (ИТ-решения) на основе изучения проблемы несоответствия навыков начинающих специалистов в ИТ-сфере требованиям рынка труда, а также рассмотрении существующих систем для карьерного планирования. Объектом исследования выступает процесс карьерного планирования специалиста в сфере ИТ к найму на работу. Предметной областью являются информационные системы карьерного планирования выпускников направлений, связанных с компьютерными технологиями.

Результаты исследования

В исследовании проведено анкетирование специалистов в области ИТ с использованием анкеты для оценки распространенности проблемы и выявления факторов, препятствующих пониманию студентами перспектив собственной карьеры в сфере ИТ. В опросе приняли участие более двухсот человек. По уровню образования респонденты распределились следующим образом: 59% — бакалавриат, 29% — магистратура, 4% — специалитет, 2% —

колледж, 6% — другое. Опыт работы в ИТ у 38% составляет от 1 года до 3 лет, у 20% — менее 1 года, у 10% — от 3 до 6 лет, у 6% — более 7 лет, 26% не имеют опыта работы. Результаты показали, что 84% респондентов считают, что существует проблема недопонимания студентами карьерного пути, при этом половина отмечает, что она серьезная. 65% опрошенных сталкивались со сложностями в выборе направления (рисунок 1).

Считаете ли вы, что существует проблема недопонимания студентов относительно выбора карьерного пути в ИТ?



Есть ли у вас сложности в определении своего пути в ИТ-индустрии?



Рисунок 1. Круговая диаграмма результатов ответа на вопрос о наличии проблемы определения ИТ-специалистов карьерного пути

Figure 1. Pie chart of the results of the answer to the question about the existence of the problem of determining the IT specialists career path

Основные трудности, которые испытывают студенты это неопределенность в собственных интересах (отметили 67% опрошенных), затруднение в выборе конкретных технологий, навыков, компетенций (54%), несоответствие учебных программ требованиям рынка труда (40%), недостаток информации о доступных путях и технологиях (33%). По мнению большинства опрошенных (94%), су-

ществует значительный разрыв между ИТ-образованием и требованиями рынка труда. Главными причинами этого являются отсутствие учебных проектов, связанных с реальными задачами (65%), устаревшие технологии в учебных планах (62%), отсутствие фокуса на мягких навыках (soft skills) и коммуникации (44%), отсутствие востребованных учебных дисциплин (43%) (рисунок 2).

Существует ли, по вашему мнению, разрыв между академическим образованием в ИТ и требованиями реального рынка труда?

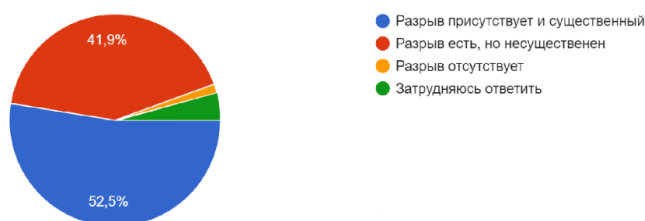


Рисунок 2. Круговая диаграмма результатов ответа на вопрос о существовании разрыва между академическим образованием в ИТ и требованиями рынка труда

Figure 2. Pie chart of the results of the answer to the question about the existence of a gap between academic education in IT and the requirements of the labor market

Наиболее полезными источниками информации студенты считают менторов (71%), совместные проекты университетов и ИТ-компаний (71%), командные проекты. При выборе направления на основе собственного интереса и рыночного спроса, многие отмечают важность обоих факторов (51%), больше опи-

раются на собственные желания 44% респондентов, в основном на рыночный спрос ориентируются 5% участников опроса. Подавляющее большинство опрошенных (69%) заинтересованы в использовании рекомендательных систем для выбора карьерной траектории с учетом интересов, навыков и тенденций рынка труда.

Результаты исследования подтверждают наличие проблем в понимании студентами ИТ-специальностей карьерного пути, что требует разработки инструментов профориентации, чтобы сгладить разрыв между образованием и потребностями рынка труда. Рекомендательные системы, учитывающие интересы, компетенции студентов и потребности рынка труда, могут стать одним из таких решений (Таблица 1).

Такие системы возможно разделить на две основные группы: слабо автоматизированные и высоко автоматизированные. К слабо автоматизированным системам относятся решения, в которых основная работа по обработке данных, их структурированию, анализу и подготовке рекомендаций выполняется экспертами вручную. Автоматизация затрагивает рутинные процессы, извлечение исходных данных из источников, их обработка. Такими системами являются “Roadmap.sh”, “GetMentor”. Высокоавтоматизированные системы поддержки карьерного планирования ИТ-специалистов широко используют технологии искусственного интеллекта и обработки больших данных. Они автоматизируют большинство процессов, таких как сбор, анализ данных о рынке труда, формирование прогнозов и выработка рекомендаций, минимизируя участие экспертов. Среди зарубежных систем можно выделить “NUS Career+”, “Eightfold”, «РосНавык».

“Roadmap.sh” предоставляет инструмент для создания и визуализации планов обучения. Основные функции: создание планов, отслеживание прогресса, визуализация. Преимущества: совместное ведение карьерного пути, визуализация индивидуальных карьерных траекторий. Недостаток: зависимость от активности

сообщества, что влияет на качество и актуальность планов.

“GetMentor” — система для установления профессиональных связей. Функции: поиск наставников по профессиональной области. Преимущества: оптимизация поиска наставника за счёт централизованной базы данных. Недостатки: зависимость от числа зарегистрированных пользователей, отсутствие рейтингов и отзывов.

“NUS Career+” — платформа Национального университета Сингапура для карьерной ориентации студентов, интегрированная в учебный процесс. Функции: создание профилей студентов, сопоставление с вакансиями, рекомендации учебных материалов, стажировок, курсов. Включает аналитику навыков и динамики спроса, функцию наставничества. Преимущества: персонализация рекомендаций, сетевое взаимодействие. Ограничение: закрытый характер платформы.

“Eightfold” — платформа для автоматизации подбора персонала и управления талантами. Функции: интеллектуальный поиск резюме, оценка навыков, прогнозирование совместимости сотрудников, рекомендации по обучению. Преимущества: повышение эффективности подбора и развития талантов. Ограничение: ориентация на рекрутеров, слабая связь с тенденциями рынка труда.

«РосНавык» — аналитическая система для мониторинга рынка труда в России. Функции: сбор и анализ вакансий, оценка востребованности навыков, мониторинг динамики спроса. Преимущества: актуальные данные о рынке труда, аналитика больших данных, открытый доступ. Недостатки: отсутствие прогнозирования и анализа взаимосвязей навыков.

Таблица 1. Типология систем карьерного планирования

Table 1. Typology of career planning systems

Тип / Type	Особенности / Features	Примеры / Examples
Информационно-аналитические	Сбор и анализ данных о рынке труда Формирование отчетов о навыках, динамике спроса Применение методов анализа больших данных	«РосНавык»
Рекомендательные	Формирование рекомендаций по карьере, обучению Применение машинного обучения	“Roadmap.sh”, “Eightfold”
Коммуникативные	Получение персональных консультаций Расширение профессиональных связей	“GetMentor”
Интегрированные	Совмещение нескольких типов систем карьерного планирования в разной мере	“NUS Career+”

Дискуссия

По результатам анализа представленных систем карьерного планирования для ИТ-

специалистов можно выделить основные пути их развития, такие, как переход от общих рекомендаций к персонализированным, для фор-

мирования индивидуальных планов по карьерному росту, интеграция с корпоративными и HR-платформами компаний для повышения эффективности системы подбора и управления персоналом, использование методов машинного обучения и анализа больших данных для выявления закономерностей и формирования рекомендаций, упор на аналитику рынка труда, фокус на сборе и анализе актуальных данных о вакансиях, компетенциях и зарплатах, для формирования понимания ситуации на рынке труда, развитие сетевого взаимодействия, совместное формирование базы знаний сообществом пользователей, содействие установлению профессиональных связей между участниками. Наиболее эффективными представляются системы, интегрирующие персонализированные рекомендации на основе профилей пользователей с аналитикой рынка труда и технологиями искусственного интеллекта. Разработка и внедрение новой специализированной системы карьерного планирования для ИТ-специалистов представляется перспективной задачей в силу ряда причин. Имеющиеся сервисы ориентированы либо на аналитику рынка труда, либо на рекомендации по карьере, в то время как для эффективного планирования требуется комплексный подход, сочетающий оба этих аспекта. При этом в имеющихся системах практически не реализованы механизмы прогнозирования динамики рынка труда, изменения спроса на навыки. Для извлечения и анализа слабо структурированной информации из текстов вакансий возможно использовать современные языковые модели, что расширяет возможности для обработки и выявления корреляций.

Предлагаемая система карьерного планирования для ИТ-специалистов включает компоненты:

- получение списка востребованных вакансий и навыков,
- получение статистики резюме,
- защита информации от мошенников,
- получение прогноза спроса на конкретные компетенции,
- получение траекторий обучения и рекомендаций по повышению уровня квалификации,
- обработка «мягких» и технических навыков.

Процесс формирования дорожной карты для ИТ-специалиста описан в диаграмме в нотации IDEF0 для заданного процесса (рисунок 3). Изначально происходит сбор вакансий с профессиональных платформ, выявление навыков, компетенций из текста, а также получение мета-данных о каждой вакансии (дата размещения, уровень специалиста, направление, местоположение, заработная плата). Затем строится граф компетенций для выявления связанных между собой навыков, группировка их для дальнейшего объединения в направления, модули. На втором этапе происходит сбор данных о навыках и интересах пользователя, сравниваются цели и потребности рынка труда, формируется список навыков, разделенных на обязательные, дополнительные, перспективные. Затем на основе данных об уровне вакансий, в которых данный навык был востребован, а также зависимость между компетенциями, определяется последовательность освоения. Позднее на основе сложности, включенности навыков друг в друга дорожная карта иерархически структурируется, образуя модули. В результате формируется дорожная карта для ИТ-специалиста. Помимо этого, раз в заранее заданный период происходит обновление и адаптация карты на основе новых вакансий, а также успехов пользователя.

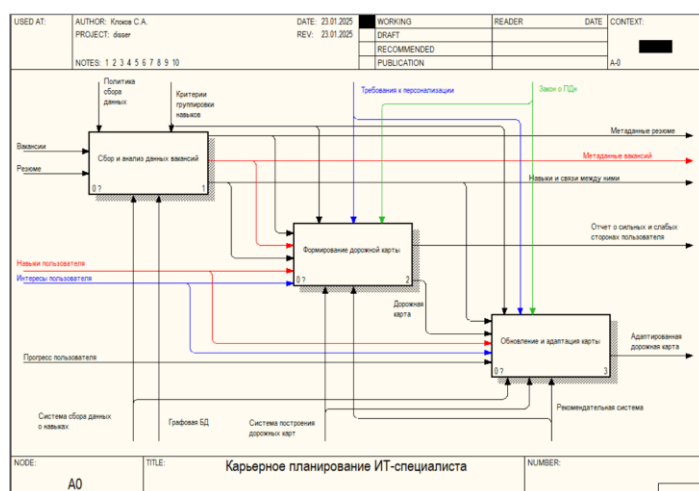


Рисунок 3. Диаграмма A0 процесса карьерного планирования в нотации IDEF0

Figure 3. Diagram A0 of the career planning process in IDEF0 notation

Диаграмма A1 иллюстрирует процесс сбора и анализа метаданных о вакансиях и резюме (рисунок 4). Включает этапы обработки данных, структуризации навыков и связей между ними. Процесс направлен на создание графовой базы данных для использования в рекомендательной системе.

Структура системы отражена в диаграмме компонентов и дизайне системы (рисунок 5). Фрагмент проектируемой системы карьерного планирования ИТ-специалистов представлен на рисунке 6.

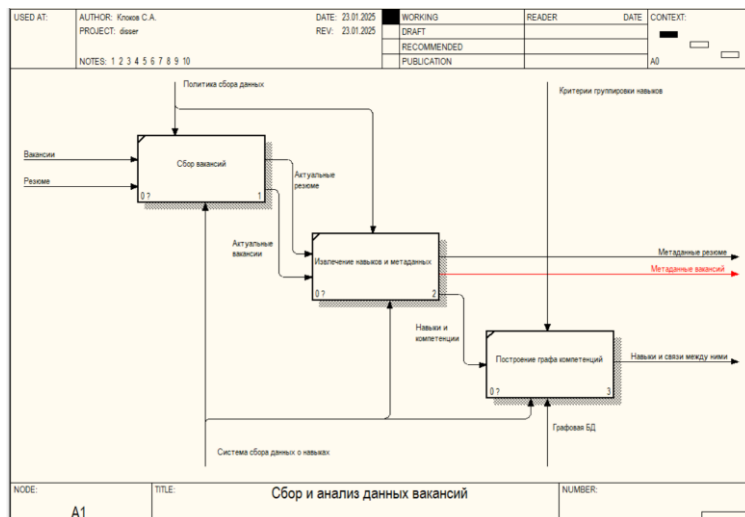


Рисунок 4. Диаграмма A1 Сбор и анализ данных вакансий в нотации IDEF0

Figure 4. Diagram A1 Collection and analysis of job data in IDEF0 notation

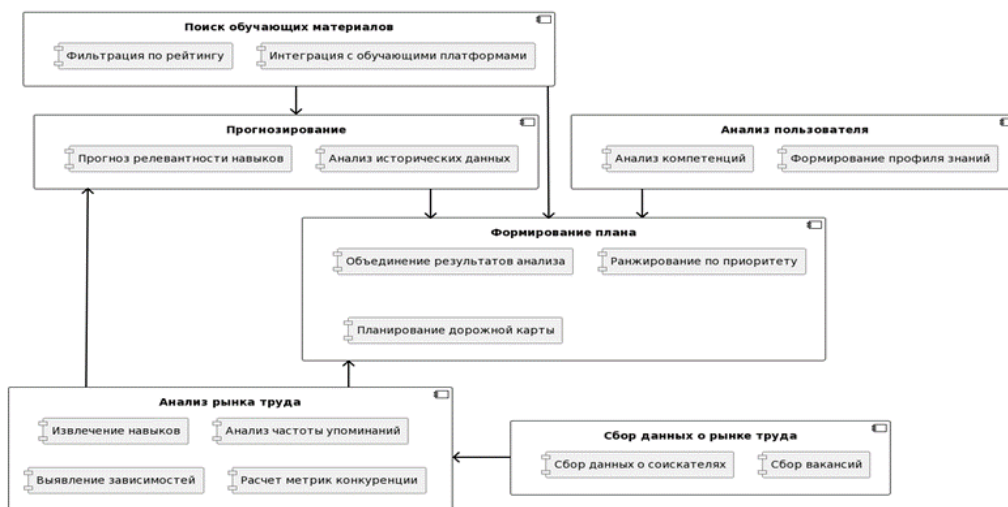


Рисунок 5. Диаграмма компонентов системы карьерного планирования ИТ-специалистов

Figure 5. Component diagram of the career planning system of IT specialists

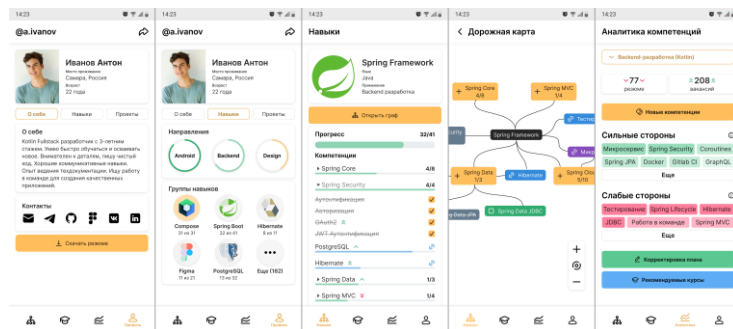


Рисунок 6. Фрагмент проектируемой системы карьерного планирования ИТ-специалистов

Figure 6. A fragment of the design of the career planning system for IT specialists

В рамках процесса сбора данных из открытых источников были получены 23 тысячи вакансий, после чего данные преобразованы в граф. Узлами являлись компетенции, ребра

имели вес, равный количеству совместного упоминания вакансий. Затем была использована сторонняя библиотека для отображения графовой базы данных (рисунок 7).

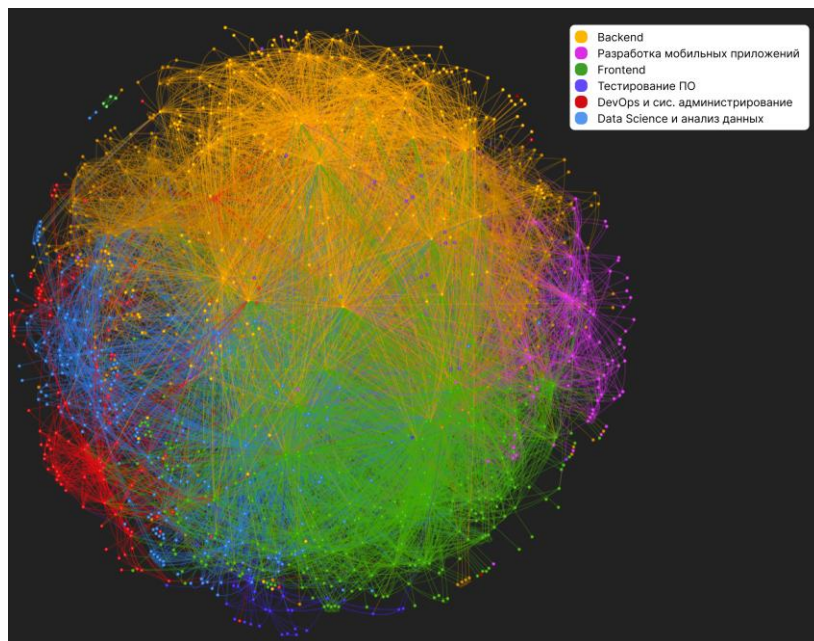


Рисунок 7. Компетенции и связи между ними, выявленные из текста вакансий и резюме

Figure 7. Competencies and links between them, identified from the text of vacancies and resumes

В результате для каждого кластера можно выделить наиболее востребованные, ключевые компетенции (таблица 2).

Таблица 2. Список наиболее востребованных компетенций

Table 2. The list of the most demanded competencies

Направление / Direction	Компетенции / Competencies	Общее количество / Total number
Backend	API, SQL, Git, Python, Java, Go, Docker, Apache Kafka	3820
Разработка мобильных приложений	Android, API, Git, Kotlin, iOS, Flutter, UI/UX Design	1486
Frontend	API, Git, HTML/CSS, PHP, PostgreSQL, Docker, React	4298
Тестирование ПО	Автоматическое тестирование, функциональное тестирование, Postman, регрессионное тестирование, API, ручное тестирование	985
DevOps и сис. администрирование	Linux, CI/CD, Docker, Kubernetes, сетевой мониторинг, Python, SQL	1087
Data Science и анализ данных	Python, SQL, Pandas, NumPy, Scikit-Learn, Tensorflow, статистика	2634

Для формирования дорожной карты необходимо основываться на ее востребованности. В рамках разрабатываемой системы были предложены четыре параметра, влияющих на востребованность навыка: соотношение количества вакансий к резюме, динамика упоминания компетенции в течение некоторого промежутка времени, средний уровень заработной платы, актуальность вакансии (время создания). Для каждого навыка был произведен рас-

чет данных параметров, чтобы ориентироваться на них при формировании дорожной карты.

Для оценки качества работы системы необходимо провести эксперимент на тестовых данных. В качестве интересов пользователя было взято направление разработки “Backend” и язык программирования “Kotlin”. В результате была сгенерирована дорожная карта, состоящая из 10 основных этапов: основы Kotlin, фреймворки для Backend, работа с базами данных,

API и сетевые взаимодействия, аутентификация и авторизация, конфигурация и окружение, логирование, тестирование, микросервисы и облака, архитектурные подходы. Изначально создается дерево глубиной в 3: направление, биб-

лиотека/фреймворк, тема. Каждая тема может быть расширена пользователем. В данном случае произведено расширение темы “Reactive Spring (WebFlux)” (рисунок 8).

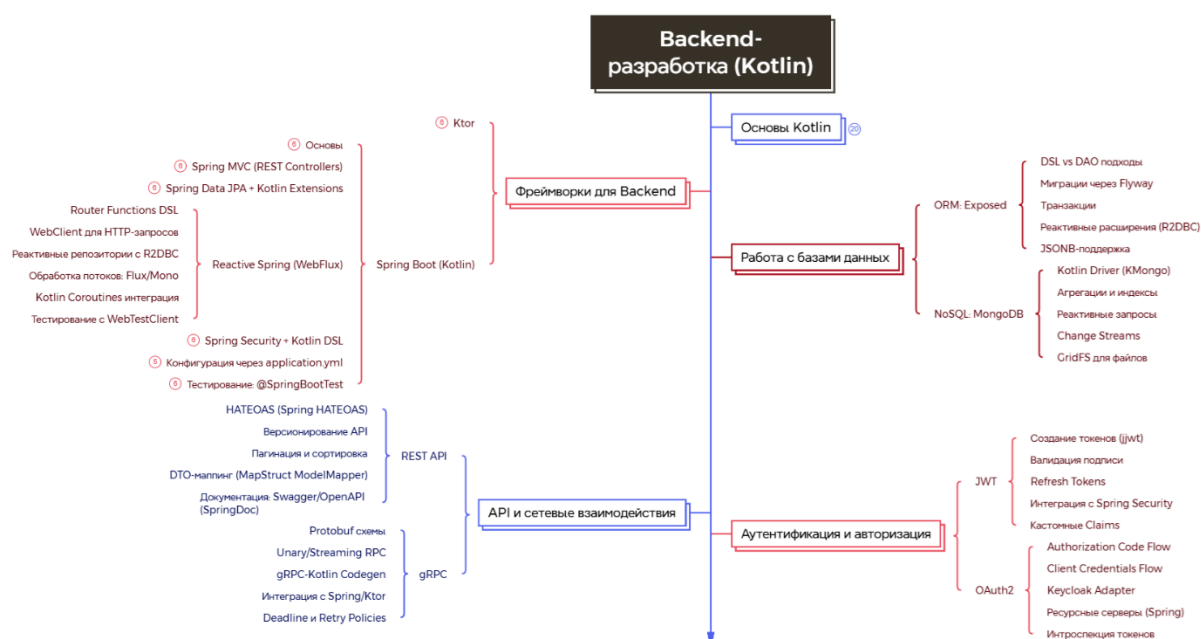


Рисунок 8. Фрагмент дорожной карты Backend-разработчика на языке Kotlin

Figure 8. A fragment of the roadmap of the Backend developer in the Kotlin language

Созданная дорожная карта покрывает все компетенции, которые востребованы на рынке труда на данный момент, помимо этого включает набирающие популярность направления, такие как реактивное программирование (WebFlux, R2DBC).

Выводы

Таким образом, проведенный анализ позволяет удостовериться в существовании проблемы несоответствия квалификации выпускников ИТ-специальностей запросам работодателей, сформулировать на основе анкетирования и изучения существующих систем требования для разработки собственной системы интегрированного типа:

- персонализированные рекомендации на основе интересов и компетенций специалиста,
- учет спроса на ИТ-специалистов и тенденций рынка труда,

- интеграция с образовательными платформами и курсами,
- использование интеллектуальных алгоритмов машинного обучения, в том числе существующих языковых моделей,
- возможность построения гибких индивидуальных траекторий обучения,
- учет региональной специфики и наличия образовательных ресурсов,
- охват не только технических, но и мягких навыков (“soft skills”).

Разработка такой системы позволяет повысить скорость карьерного планирования, эффективность профориентации студентов ИТ-специальностей, покрыть различные аспекты построения дорожных карт, а также сократить разрыв между программами обучения в учебных заведениях и потребностями рынка труда.

Литература

1. Аветисян П.С., Заславская М.И., Титаренко Л.Г. [и др.]. Современные тенденции и приоритеты развития высшего образования государств-членов Евразийского экономического Союза: Армения, Беларусь, Россия // Ереван : Российско-Армянский (Славянский) университет. 2023. 312 с.

2. Ахмедов З.К. Оптимизация кадрового планирования организации в условиях стратегических изменений // Вестник экспертного совета. 2021. № 4. С. 32–38.
3. Жук О.Л. Предпринимательская трансформация университетов в условиях четвертой промышленной революции // Журнал Белорусского государственного университета. Журналистика. Педагогика. 2019. № 1. С. 108–116.
4. Лозицкий В.Л. Цифровизация образовательной сферы и обеспечение преемственности систем общего среднего и высшего образования в Республике Беларусь в условиях информационно-образовательной среды // Веснік Мазырскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя І.П. Шамякіна : навуковы часопіс. 2023. № 2(62). С. 68–73.
5. Сухомлин В. А. Система международной стандартизации в области ИТ, ее роль в развитии информационной индустрии и принципы функционирования // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2022. Т. 18, № 2. С. 412–440.
6. Калевко В.В., Лагерева Д.Г., Подвесовский А.Г. Управление образовательной программой вузов в контексте подготовки конкурентоспособных разработчиков программного обеспечения // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 4. С. 803–814.
7. Булах К.В., Бурцева Е.Т. Модель профессиональной подготовки специалиста с учетом требований современного рынка труда // Вестник Адыгейского государственного университета. 2018. № 3(223). С. 39–44.
8. Ковалевич М.С., Леонюк Н.А. Успешность карьеры как условие личностной и профессиональной самореализации // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 3. Філалогія. Педагогіка. Псіхалогія. 2023. № 3. С. 112–121.
9. Захарова А.А., Лазарева А.Н., Зорина О.Ю. Информационная система оценки образовательных программ на основе требований // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2 (1). С. 136–143.
10. Лебедева Т.Ф., Муравьев С.А. Профессиональные стандарты в сфере информационных технологий как руководство к действию // Профессиональное образование в России и за рубежом. 2016. № 4 (24). С. 92–97.
11. Али А., Марван Х. Исследование компетенций управления карьерой в реализации обучения на основе работы (WBL) // Журнал технического образования и обучения 2019. № 11. С. 159–166.
12. Смит Д., Али А. Анализ тренда вакансий по компьютерному программированию с использованием веб-данных // Проблемы информатики и информационных технологий. 2014. № 11. С. 203–214.
13. Ильин Д. Ю., Никульчев Е. В., Бубнов Г. Г. [и др.]. Информационно-аналитический сервис формирования актуальных профессиональных компетенций на основе патентного анализа технологий и выделения профессиональных навыков в вакансиях работодателей // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 2(38). С. 71–88.

References

1. Avetisyan P.S., Zaslavskaya M.I., Titarenko L.G. [et al.]. Current trends and priorities in the development of higher education in the member states of the Eurasian Economic Union: Armenia, Belarus, Russia // Yerevan : Russian-Armenian (Slavic) University. 2023. 312 p.
2. Akhmedov Z.K. Optimization of personnel planning of an organization in the context of strategic changes // Bulletin of the Expert Council. 2021. No. 4. pp. 32-38.
3. Zhuk O.L. Entrepreneurial transformation of universities in the context of the fourth Industrial Revolution // Journal of the Belarusian State University. Journalism. Pedagogy. 2019. No. 1. pp. 108-116.
4. Lozitsky V.L. Digitalization of the educational sphere and ensuring the continuity of the systems of general secondary and higher education in the Republic of Belarus in the conditions of the information and educational environment // Vesnik Mazyrskaga dzarzhainaga pedagogichnaga yuniversit. imya I.P. Shamyakina : navukov hours. 2023. No. 2(62). p. 68-73.
5. Sukhomlin V. A. The system of international standardization in the field of IT, its role in the development of the information industry and the principles of functioning // Modern information technologies and IT education. 2022. Vol. 18, No. 2. pp. 412-440.
6. Kalevko V.V., Lagerev D.G., Suspensovsky A.G. Management of the educational program of universities in the context of training competitive software developers // Modern information technologies and IT education. 2018. Vol. 14. No. 4. pp. 803-814.
7. Bulakh K.V., Burtseva E.T. The model of professional training of a specialist taking into account the requirements of the modern labor market // Bulletin of the Adygea State University. 2018.No.3(223).pp.39-44.

8. Kovalevich M.S., Leonyuk N.A. Career success as a condition for personal and professional self-realization // *Vesnik Grodzenskaga dzarzhainaga yuniversiteta imya Yanki Kupala. Gray 3. Filology. Pedagogy. Psychology*. 2023. No. 3. pp. 112-121.

9. Zakharova A.A., Lazareva A.N., Zorina O.Yu. Information system for evaluating educational programs based on requirements // *Modern problems of science and education*. 2015. No. 2 (1). pp. 136-143.

10. Lebedeva T.F., Muravyev S.A. Professional standards in the field of information technology as a guide to action // *Vocational education in Russia and abroad*. 2016. No. 4 (24). pp. 92-97.

11. Ali A., Marwan H. A study of career management competencies in the implementation of work-based learning (WBL) // *Journal of Technical Education and Training* 2019. No. 11. C. 159-166.

12. Smith D., Ali A. Analysis of the trend of vacancies in computer programming using web data // *Problems of computer science and information technology*. 2014. No. 11. pp. 203-214.

13. Ilyin D. Yu., Nikulchev E. V., Bubnov G. G. [et al.]. Information and analytical service for the formation of relevant professional competencies based on patent analysis of technologies and the allocation of professional skills in employer vacancies // *Caspian Journal: Management and High Technologies*. 2017. No. 2(38). pp. 71-88.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Клоков Сергей Алексеевич	магистр 2 курса, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», магистр кафедры «Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий», se.klokov@gmail.com
Бирюкова Анна Алексеевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», доцент кафедры «Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий», biryukova@mirea.ru SPIN-код: 3837-5444 ORCID: 0000-0002-7173-1957

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Klokov Sergey Alekseevich	Master's student, MIREA – Russian Technological University, 2nd year student of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, se.klokov@gmail.com
Biryukova Anna Alekseevna	PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, MIREA – Russian Technological University, Associate Professor of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, biryukova@mirea.ru SPIN-code: 3837-5444 ORCID: 0000-0002-7173-1957

статья поступила в редакцию 03.02.2025	одобрена после рецензирования 19.02.2025	принята к публикации 05.03.2025
the article was submitted 03.02.2025	approved after reviewing 19.02.2025	accepted for publication 05.03.2025

СБОР ДАННЫХ С WILDBERRIES ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЙ МОДЕЛИ КОНКУРЕНЦИИ НА МАРКЕТПЛЕЙСЕ

Игорь Анатольевич Часовских[✉] 1 i_chasovskih03@mail.ru
 Михаил Григорьевич Матвеев 1 mgmatveev@yandex.ru

¹Воронежский государственный университет, ул. Университетская площадь, 1, Воронеж, 394018, Россия

Аннотация. В данной работе рассматривается разработка парсера, реализующего автоматизированный сбор данных с маркетплейса Wildberries, для последующего алгоритмического анализа ключевых показателей товаров. Основное внимание уделяется извлечению таких параметров, как рейтинг товара, количество отзывов, начальная цена и цена со скидкой, которые впоследствии используются для построения математической модели поддержки принятия решений продавцов в условиях конкуренции. Реализация парсера выполнена на языке Python с использованием библиотек для обработки HTTP-запросов и работы с форматами CSV/XLSX. На основе собранных данных предложена теоретико-игровая модель, позволяющая оценивать вероятности совершения сделок для продавца-заявителя и продавца с обобщённым спросом. Модель учитывает функционально-стоимостные ограничения и агрегирует параметры спроса покупателей с применением методов нечёткой логики и интеграла Шоке. Результаты работы демонстрируют возможность оптимизации стратегий продаж на маркетплейсе за счёт анализа конкурентной среды. Разработанный инструмент может быть использован для автоматизации сбора данных и повышения эффективности управления товарными предложениями на Wildberries.

Ключевые слова: маркетплейс, Wildberries, конкуренция, покупательский спрос, парсинг, Python, нечёткость, оператор агрегирования, теоретико-игровая модель.

Для цитирования: Часовских И. А., Матвеев М. Г. Сбор данных с Wildberries для построения теоретико-игровой модели конкуренции на маркетплейсе // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 89-103.

Original article

COLLECTING DATA FROM WILDBERRIES TO BUILD A GAME-THEORETIC MODEL OF COMPETITION ON THE MARKETPLACE

Igor A. Chasovskikh[✉] 1 i_chasovskih03@mail.ru
 Mikhail G. Matveev 1 mgmatveev@yandex.ru

¹Voronezh state university, University sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

Annotation. The article considers the development of a parser that implements automated data collection from the Wildberries marketplace for subsequent algorithmic analysis of key product indicators. The main focus is on extracting parameters such as product rating, number of reviews, initial price, and discounted price, which are subsequently used to build a mathematical model to support sellers' decision-making in a competitive environment. The parser is implemented in Python using libraries for processing HTTP requests and working with CSV/XLSX formats. Based on the collected data, a game-theoretic model is proposed that makes it possible to estimate the probabilities of transactions for the applicant seller and the seller with generalized demand. The model takes into account functional and cost constraints and aggregates the parameters of customer demand using the methods of fuzzy logic and the Shock integral. The results demonstrate the possibility of optimizing sales strategies on the marketplace by analyzing the competitive environment. The developed tool can be used to automate data collection and improve the efficiency of managing product offerings on Wildberries.

Keywords: marketplace, Wildberries, competition, customer demand, parsing, Python, fuzziness, aggregation operator, game-theoretic model.

For citation: Chasovskikh I. A., Matveev M. G. Collecting data from Wildberries to build a game-theoretic model of competition on the marketplace. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (1 (9)): 89-103. (In Russ.).

Введение

За последнее время маркетплейсы приобрели широкую популярность в России и стали самым быстрорастущим каналом для продаж товаров различных категорий. При этом рынок маркетплейсов продолжает набирать обороты – в 2023 году объём рынка электрон-

ной коммерции в России составлял 7.7 трлн рублей, что на 49% больше, чем в прошлом году. Причины популярности маркетплейсов следует рассматривать как с точки зрения покупателей, так и с точки зрения продавцов [1].

Для покупателей маркетплейсы предоставляют возможность сравнивать и выбирать

товары из широкого ассортимента, читать отзывы других покупателей, а также совершать покупки в любое время и в любом месте, избавляя от необходимости посещения физических магазинов, тем самым экономя личное время.

Для продавцов маркетплейсы предоставляют возможность выхода на большое количество потенциальных покупателей без необходимости значительных вложений в маркетинг и рекламу, использование готовой инфраструктуры – платформы для онлайн-продаж, системы оплаты, логистические решения (услуги по хранению, упаковке и доставке товаров со складов маркетплейсов), службы поддержки клиентов и многого другого.

Целью данной работы является разработка парсера для сбора данных со страниц категорий товаров маркетплейса Wildberries, а также применение полученных данных для поддержки принятия решений продавца на маркетплейсе в условиях конкуренции.

Материалы и методы исследования

Парсеры – это специальные программы, онлайн-сервисы или скрипты, которые собирают данные по заданным критериям из различных источников (сайтов, аккаунтов социальных сетей и других интернет-площадок), а затем преобразуют их к необходимому формату. Парсинг данных позволяет автоматизировать процесс сбора ценной информации с различных веб-страниц [2].

Также разработчики различных сервисов могут предоставлять специальный набор ссылок (URL), на которые можно отправлять HTTP-запросы. В таком случае сайт, на котором располагается сервис, будет отдавать сразу структурированные данные, например, в

формате JSON. Совокупность форматов таких запросов образует API [3].

API (Application Programming Interface) представляет собой совокупность правил, обеспечивающих взаимодействие между различными программными продуктами. API предоставляет разработчикам набор запросов, протоколов, функций и инструментов, необходимых для быстрого получения и обмена данными между приложениями.

Для успешного функционирования на платформе Wildberries важно понимать ключевые показатели товаров, которые влияют на спрос, рейтинги и позиции в поисковой выдаче. Знание этих показателей помогает продавцам оптимизировать свои предложения, а покупателям – делать более осознанный выбор.

Каждый из товаров на Wildberries относится к какой-либо категории. Пользователь может зайти на маркетплейс, выбрать интересующую его категорию и просмотреть список однородных товаров, которые в ней доступны. На странице категории отображается список карточек товаров, содержащих краткую информацию.

Данные о карточках товаров можно получить из соответствующего GET-запроса, выполняемого при загрузке страницы. В ответе на данный запрос приходят данные в формате JSON, представляющие собой информацию о карточках товаров. В частности, в ответе приходит массив `products`, элементами которого являются объекты – карточки товаров, которые содержат множество параметров, характеризующих соответствующий товар. В таблице 1 представлен пример объекта, содержащий информацию о карточке товара в массиве `products` для категории «Зеркала».

Таблица 1. Пример объекта в массиве `products`

Table 1. Example of an object in the `products` array

Параметр / Parameter			Значение / Value
1			2
__sort			101613
ksort			7815
time1			2
time2			23
wh			206348
dtype			4
dist			208
id			246678475
root			220626760
kindId			0
brand			KONONO
brandId			8016
siteBrandId			0

1			2
colors [{ }]			
	name		черный
	id		0
subjectId			198
subjectParentId			8747
name			Зеркало напольное в полный рост интерьерное
entity			Интерьерные зеркала
matchId			0
supplier			Konono Shop
supplierId			12215
supplierRating			4.7
supplierFlags			0
pics			11
rating			5
reviewRating			4.5
nmReviewRating			3.9
feedbacks			6440
nmFeedbacks			176
panelPromold			197172
promoTextCard			РАСПРОДАЖА
promoTextCat			РАСПРОДАЖА
volume			192
viewFlags			1319368
sizes [{ }]			
	name		
	origName		0
	rank		0
	optionId		386514846
	wh		206348
	time1		2
	time2		23
	dtype		4
	price { }		
		basic	899000
		product	300600
		total	300600
		logistics	0
		return	0
	saleConditions		134217739
	payload		FylMX9Hen1nMXWYkM4p/4GcCdmIo0hcBDJ NMisGBnH2kipMqvYBVgaSwpRi6eGYR3C6GtvC y38OvFlW2Ho4
totalQuantity			309
logs			MZ+veug3eEEXYV/8bu VN1z9HH2zh516IXDLOd Yii9BIret1bp4jF5m768vh/PT9kO8s
meta { }			
	tokens []		

В итоге, из данного запроса можно получить такую информацию о товарах, например, как: идентификатор товара, название товара, наименование продавца, доступные цвета и размеры, количество отзывов, цены, иденти-

фикаторы складов, на которых данный товар хранится и многое другое. Но не все из получаемых параметров будут полезны для дальнейшего анализа.

Для парсинга данных потребуются следующие библиотеки Python [4]:

- requests – библиотека для выполнения HTTP-запросов к указанному URL. Requests предоставляет встроенные функциональные возможности для управления как запросом, так и ответом. Модуль Python requests имеет несколько встроенных методов для выполнения HTTP-запросов к указанному URL-адресу с использованием запросов GET, POST, PUT, PATCH или HEAD;

- csv – библиотека, предназначенная для работы с файлами формата CSV;

- xlswriter – библиотека, которая используется для записи текста, чисел, формул и гиперссылок на несколько рабочих листов в файле XLSX. Конкретно из этой библиотеки нам понадобится класс Workbook для последующей работы с электронной таблицей.

Предпочтения покупателей чаще всего являются неточными и приблизительными. Например, покупателю необходим определённый товар, который будет стоить от 500 до 1800 рублей, при этом какие-то значения из данного диапазона будут более предпочтительны, а какие-то наоборот – менее. Аналогично и для продавца на маркетплейсе какие-то значения ценового диапазона будут более и менее предпочтительным. В таком случае покупательский спрос и функционально-стоимостные ограничения будет удобно представить в виде лингвистических переменных, которые задаются с помощью функций принадлежности [5]. Рассмотрим несколько видов функций принадлежности.

Кусочно-линейные функции принадлежности – это функции, состоящие из отрезков прямых линий, тем самым образуя непрерывную или кусочно-непрерывную функцию. Функции данного вида используются для задания неопределённости типа: «почти равен», «располагается в диапазоне», «приблизительно схож» и т.д. Одной из наиболее часто используемых функций данного вида является треугольная функция принадлежности. Аналитически в общем случае данная функция принадлежности может быть записана в следующем виде:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-\alpha}{m-\alpha}, & \alpha \leq x < m \\ \frac{\beta-x}{\beta-m}, & m \leq x \leq \beta \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1)$$

где m – модальное значение, α – левый коэффициент нечёткости, β – правый коэффициент нечёткости, x – произвольное действительное

число. При этом коэффициенты упорядочены следующим образом: $\alpha \leq m \leq \beta$ [6]. На рисунке 1 показан график, отображающий представление нечёткого числа «Примерно 3», заданного с помощью треугольной функции принадлежности с $\alpha = 1$ и $\beta = 6$.

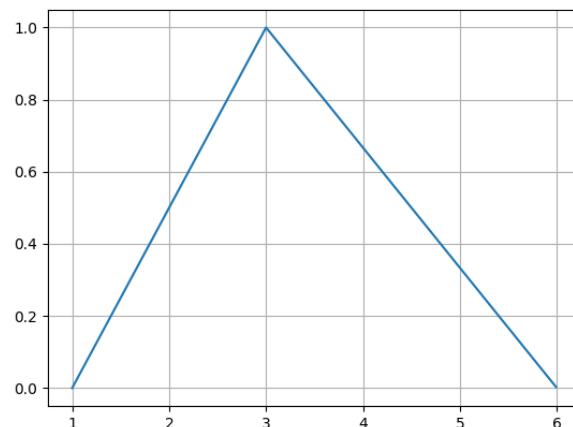


Рисунок 1. Нечёткое число «Примерно 3», заданное с помощью треугольной функции распределения с $\alpha = 1$ и $\beta = 6$

Figure 1. The fuzzy number "About 3", defined using the triangular distribution function with $\alpha = 1$ and $\beta = 6$

S-образные функции принадлежности – название данных функций также исходит из вида кривых, представляющих их графики. S-образная функция (кривая) используется для задания неопределённости типа: «большое количество», «большая величина», «высокая цена» и т.д. Аналитически в общем случае данная функция может быть записана следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < \alpha \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} * \cos\left(\frac{x-\beta}{\beta-\alpha} * \pi\right), & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & x > \beta \end{cases} \quad (2)$$

где α – левый коэффициент нечёткости, β – правый коэффициент нечёткости, x – произвольное действительное число. При этом коэффициенты упорядочены следующим образом: $\alpha < \beta$.

S-образная функция также называется сплайн-функцией и в общем случае может быть задана аналитическим выражением другого вида:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha \\ 2\left(\frac{x-\alpha}{\beta-\alpha}\right)^2, & \alpha < x \leq \frac{\alpha+\beta}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{\beta-x}{\beta-\alpha}\right)^2, & \frac{\alpha+\beta}{2} < x < \beta \\ 1, & \beta \leq x \end{cases} \quad (3)$$

где α – левый коэффициент нечёткости, β – правый коэффициент нечёткости, x – произвольное действительное число. При этом

коэффициенты упорядочены следующим образом: $\alpha < \beta$.

Также к типу S-образной функции принадлежности может быть отнесена сигмоидальная функция, которая в общем случае задаётся аналитическим следующим выражением:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(x-\beta)}}, \quad (4)$$

где α – левый коэффициент нечёткости, β – правый коэффициент нечёткости, x – произвольное действительное число, e – основание натуральных логарифмов, которое иницирует задание соответствующей экспоненциальной функции. При этом коэффициенты упорядочены следующим образом: $\alpha < \beta$. В случае, если $\alpha > 0$, то получаем S-образную функцию принадлежности, а если $\alpha < 0$, то Z-образную функцию принадлежности.

На рисунке 2 представлен график S-функции, иллюстрирующей неопределённость типа «высокая цена».

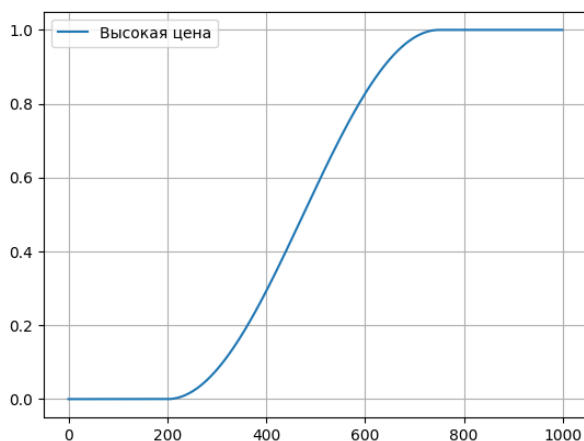


Рисунок 2. График для неопределённости типа «высокая цена», заданный с помощью S-функции принадлежности с $\alpha = 200$ и $\beta = 700$

Figure 2. Graph for uncertainty of the "high price" type, set using the S-membership function with $\alpha = 200$ and $\beta = 700$

Для S-образной функции принадлежности можно в качестве частного случая рассматривать линейную S-образную функцию, которая может быть записана следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha < x < \beta \\ 1, & \beta \leq x \end{cases}, \quad (5)$$

где α – левый коэффициент нечёткости, β – правый коэффициент нечёткости, x – произвольное действительное число. При этом коэффициенты упорядочены следующим образом: $\alpha < \beta$ [7]. На рисунке 3 представлен график линейной S-функции, иллюстрирующей неопределённость типа «высокая цена».

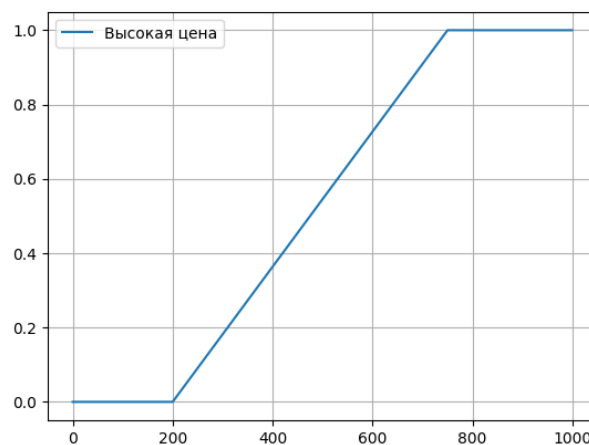


Рисунок 3. График для неопределённости типа «высокая цена», заданный с помощью линейной S-функции принадлежности с $\alpha = 200$ и $\beta = 700$

Figure 3. Graph for uncertainty of the "high price" type, defined using a linear S-function of membership with $\alpha = 200$ and $\beta = 700$

Использование линейной S-образной функции упрощает численные расчёты и сокращает вычислительные ресурсы, которые являются необходимыми для хранения отдельных значений этой функции принадлежности.

Результаты исследования и их обсуждения

Определим наиболее подходящие показатели, которые впоследствии можно будет применить для поддержки принятия решения продавца на маркетплейсе в условиях конкуренции в соответствии с математической моделью, описываемой в статье [8]. Таковыми будут являться:

— рейтинг товара (reviewRating) – это средняя оценка покупателями на основе их отзывов. Рейтинг товаров на Wildberries обычно варьируется от 1 до 5, где 5 является наилучшей оценкой. Покупатели склонны доверять товарам с высоким рейтингом, что в свою очередь, будет влиять на их выбор. Для продавца высокий рейтинг товара помогает ему занимать более высокие позиции в поисковой выдаче маркетплейса, увеличивая его видимость;

— количество отзывов (feedbacks) – показатель, отражающий активность покупателей в оценке товара. Чем больше отзывов, тем выше вероятность того, что товар привлечёт внимание покупателей. Для продавца количество отзывов, аналогично рейтингу товара, позволяет занимать более высокие позиции в поисковой выдаче маркетплейса;

— начальная цена (price.basic) – показатель, влияющий на вероятность того, что пользователь приобретёт товар, если посчитает цену приемлемой для него. Для продавца данный параметр позволяет формировать ценовую

стратегию и проводить сравнение цен с конкурентами;

— цена со скидкой (`price.product`) – аналогично начальной цене является показателем, влияющей на вероятность того, что пользователь приобретёт товар, если посчитает эту цену приемлемой для него. При этом, размер скидки может существенно повлиять на покупателя и побудить его к покупке данного товара, т.к. это будет являться выгодным предложением. Для продавца данный параметр также позволяет формировать ценовую стратегию.

Также для дальнейшего удобства восприятия полученной информации и идентификации объектов выберем параметр – название товара (`name`).

Выбранные и описанные выше ключевые показатели товаров позволяет продавцам принимать более обоснованные решения,

направленные на повышение конкурентоспособности товаров.

Обозначим лингвистические переменные и функции принадлежности для них на основе определённых ранее показателей товара для покупательского спроса и ФСО продавца:

— предпочтительность по рейтингу товара – S-образная функция;

— предпочтительность по количеству отзывов – S-образная функция;

— предпочтительность по начальной цене – треугольная функция;

— предпочтительность по цене со скидкой – треугольная функция.

Далее реализуем функцию для отправки запроса к API и получения данных в формате JSON. На рисунке 4 представлен код на языке Python, реализующий данную функцию.

```
def fetch_data(api_url): 1 usage

    response = requests.get(api_url)
    if response.status_code == 200:
        return response.json()

    else:
        print(f"Ошибка при запросе {api_url}: {response.status_code}")
        return None
```

Рисунок 4. Функция для отправки запрос к API и получения данных в формате JSON

Figure 4. Function for sending API request and receiving data in JSON format

Данная функция принимает параметр `api_url` – строку, содержащую URL-адрес API, из которого нужно получить данные. С помощью `requests.get(api_url)` отправляется HTTP-запрос к указанному URL. Далее проводится проверка статуса ответа: если ответ пришёл с кодом состояния HTTP равным 200, то функция возвращает содержимое ответа в формате

JSON с помощью метода `response.json()`. Если же код состояния ответа не равен 200, то выводится сообщение об ошибке с соответствующим кодом.

Реализуем функцию для извлечения информации о товарах из ответа API. На рисунке 5 представлен код, реализующий данную функцию.

```
def parse_products(data): 1 usage

    products = data.get('data', {}).get('products', [])

    result = []
    for product in products:
        sizes = product.get('sizes', [])
        for size in sizes:
            result.append({
                "Начальная цена": round(size.get("price").get("basic") / 100),
                "Цена со скидкой": round(size.get("price").get("product") / 100),
                "Название": product.get("name"),
                "Рейтинг товара": product.get("reviewRating"),
                "Кол-во отзывов": product.get("feedbacks"),
            })
    return result
```

Рисунок 5. Функция для извлечения информации о товарах из ответа API

Figure 5. Function for extracting information about products from the API response

На вход данной функции передаётся JSON-объект, преобразованный в словарь. Из данного JSON-объекта извлекаются ключевые показатели, определённые ранее. Значения для начальной цены и цены со скидкой делим на 100, так как изначально эти значения приходят в копейках и для удобства их требуется перевести в рубли. На выходе получаем список

словарей, каждый из которых содержит информацию о конкретном товаре.

На рисунке 6 функций для сохранения файлов в формате CSV и их последующей конвертации в XLSX-формат.

На рисунке 7 представлена реализация функции для сбора данных со всех страниц указанной категории.

```
def save_to_csv(products, filename="products.csv"): 1 usage
    with open(filename, mode='w', newline='', encoding='utf-8') as file:
        writer = csv.DictWriter(file, fieldnames=["Название", "Рейтинг товара", "Кол-во отзывов",
                                                  "Начальная цена", "Цена со скидкой"])
        writer.writeheader()
        writer.writerows(products)
        print(f"Данные сохранены в {filename}")

def convert_csv_to_xlsx(csv_filename, xlsx_filename): 1 usage
    workbook = Workbook(xlsx_filename)
    worksheet = workbook.add_worksheet()

    with open(csv_filename, mode='r', encoding='utf-8') as csvfile:
        reader = csv.reader(csvfile)
        for r, row in enumerate(reader):
            for c, col in enumerate(row):
                worksheet.write(r, c, col)

    workbook.close()
    print(f"Файл {csv_filename} преобразован в {xlsx_filename}")
```

Рисунок 6. Функции для сохранения файлов в формате CSV и их последующей конвертации в XLSX-формат

Figure 6. Functions for saving files in CSV format and their subsequent conversion to XLSX format

```
def scrape_category(base_url): 1 usage
    all_products = []
    page = 1

    while True:
        url = f"{base_url}&page={page}"
        print(f"Загружается страница {page}...")
        data = fetch_data(url)
        if not data or not data.get('data', {}).get('products', []):
            print("Больше страниц нет или данные недоступны.")
            break

        products = parse_products(data)
        all_products.extend(products)
        page += 1

    return all_products
```

Рисунок 7. Функция для сбора данных со всех страниц категории

Figure 7. Function for collecting data from all category pages

На вход данной функции передаётся URL-адрес категории товаров, который содержит параметры фильтрации, сортировки или поиска. Далее в бесконечном цикле происходит итерация по страницам категории. На каждой итерации добавляется параметр page к base_url, формируя URL для текущей страницы. При этом на каждой итерации данные о товарах извлекаются с помощью функции parse_products, которая преобразует JSON в список словарей.

Цикл прерывается в случае, если данные на текущей странице отсутствуют или недоступны. Также цикл завершается в случае, если данные отсутствуют (например, пришёл пустой JSON, структура JSON нарушена или достигнут конец страниц). После завершения цикла функция возвращает полный список всех собранных товаров из категории.

Наконец, реализуем функцию, которая должна являться основной точкой входа программы, организующей процесс сбора, обработки и сохранения данных о товарах в

выбранной категории. Данная функция объединяет несколько этапов работы, используя ранее описанные вспомогательные функции,

такие как `scrape_category()`, `save_to_csv()` и `convert_csv_to_xlsx()`. Код основной функции представлен на рисунке 8.

```
def main(): 1 usage
# Пример базового URL API для категории Wildberries
base_url = input("Введите базовый URL API для категории Wildberries: ").strip()

# Сбор данных со всех страниц
all_products = scrape_category(base_url)

# Сохранение данных в CSV
if all_products:
    csv_filename = "wildberries_products.csv"
    xlsx_filename = "wildberries_products.xlsx"
    save_to_csv(all_products, csv_filename)

# Преобразование в XLSX
convert_csv_to_xlsx(csv_filename, xlsx_filename)
else:
    print("Не удалось собрать данные.")
```

Рисунок 8. Функция main

Figure 8. The "main" function

В результате работы программы получаем XLSX, содержащий данные о товарах в указанной категории. Максимально можно получить информацию о 3000 единицах товаров, то есть спарсить информацию с 30 страниц категорий. Данное ограничение связано с политикой Wildberries и технической спецификой работы API данной компании.

Передадим на вход программы следующий URL: https://catalog.wb.ru/catalog/interior3/v2/catalog?ab_testing=false&appType=1&curr=rub&dest=12358291&hide_dtype=10&lang=ru&sort=popular&spp=30&subject=198. На рисунке 9 представлен фрагмент таблицы, сформированной в результате парсинга категории по указанному URL.

1	Название	Рейтинг товара	Кол-во отзывов	Начальная цена	Цена со скидкой
2	Зеркало напольное в полный рост на колесах	4.5	5948	9550	3545
3	Декор Зеркальный Акриловый Настенный 12 элементов	4.5	455	3430	812
4	Зеркало настенное 77 см	4.9	6333	7548	2087
5	Круглое настенное зеркало в спальню ванную 50 см	4.8	2480	3992	1545
6	Зеркало настенное 70 см	4.9	6333	7242	1945
7	Зеркало настенное 60 см с гравировкой	4.9	5337	5559	1756
8	Зеркало напольное в полный рост на колесах	4.5	5948	9550	3545
9	Зеркало круглое настенное в комнату 60 см	4.9	6718	6979	2370
10	Зеркало настенное 50 см с гравировкой	4.9	5337	4080	1385
11	Зеркало настенное 50 см в ванную	4.9	6333	2958	1261
12	Зеркало настенное круглое 40 см в ванную	4.8	808	5000	1264
13	Зеркало настенное фигурное 45 на 77 см	4.9	2556	10350	1798
14	Настенное круглое зеркало с окантовкой 50см 101774514	4.9	6718	5684	1885
15	Зеркало настенное 70*60 см	4.8	3392	4125	1564
16	Настенное зеркало с окантовкой в прихожую 77x45см	4.9	1195	6717	1963
17	Настенное зеркало с окантовкой в прихожую 110x50 см	4.9	1195	9346	3101
18	Зеркало настенное фигурное 90x60 см	4.9	856	9391	2299
19	Зеркало настенное 70 см с гравировкой	4.9	5337	7038	2001
20	Зеркало настенное 60 см	4.9	6333	6800	1557
21	Зеркало настенное в полный рост в прихожую 110x60	4.9	709	11021	4266
22	Зеркало настенное круглое в ванную 70 см	4.8	808	7956	2514
23	Зеркало настенное Капсула 77*45 см в ванную	4.9	2174	9889	1953
24	Зеркало настенное для прихожей круглое 70 см	4.9	304	4420	1571
25	Зеркало настенное 77 см с гравировкой	4.9	5337	8300	2163
26	Настенное круглое зеркало в ванную 70 см	4.8	917	6212	2944
27	Зеркало настенное в полный рост в прихожую 110x60	4.9	284	8473	3949
28	Зеркало настенное в полный рост 110x60 см	4.9	856	8543	2834
29	Зеркало настенное	4.8	3392	4433	1645
30	Зеркало настенное 30 см	4.9	6333	2784	681
31	Зеркало в ванную настенное фигурное 110x50 см капсула	4.9	2174	11500	2634
32	Зеркало напольное в полный рост на колесах	4.5	5948	9450	3210
33	Зеркало настенное для прихожей круглое 60 см	4.8	2480	5046	1913
34	Зеркало настенное в полный рост овал 110x50 см	4.9	2472	11087	4554
35	Зеркало настенное с подсветкой большое 115 на 50 см	4.9	126	15689	5577

Рисунок 9. Фрагмент таблицы данных, получаемой в результате работы программы

Figure 9. Fragment of the data table obtained as a result of the program operation

Рассмотрим в качестве примера одного продавца-заявителя и троих покупателей и вычислим равновесную смешанную стратегию для данного продавца. Однородный товар на маркетплейсе будет характеризоваться следующими параметрами: рейтинг товара, количество отзывов, начальная цена и цена со скидкой.

Таблица 2. ФСО продавца-заявителя, заданные в виде соответствующих нечётких чисел

Table 2. FSO of the applicant seller, given in the form of corresponding fuzzy numbers

Рейтинг товара / Product rating		Кол-во отзывов / Number of reviews		Начальная цена / Initial price			Цена со скидкой / Discounted price		
α	β	α	β	α	m	β	α	m	β
4.3	5	130	1050	4690	8900	16350	3987	7565	13899

Таблица 3. Характеристики покупательского спроса, заданные соответствующими нечёткими числами

Table 3. Characteristics of customer demand, given by the corresponding fuzzy numbers

Покупатель / Buyer	Объём запрашиваемого товара / Volume of requested goods	Рейтинг товара / Product rating		Кол-во отзывов / Number of reviews		Начальная цена / Initial price			Цена со скидкой / Discounted price		
		α	β	α	β	α	m	β	α	m	β
1	40	4.0	5	0	10	1500	3400	6720	675	1530	3024
2	3	4.9	5	600	1300	4100	8560	11000	2870	5992	7700
3	1	4.5	4.8	50	220	9800	14600	19000	8820	13140	17100

Определим значения функции принадлежности обобщённого покупательского спроса по каждому параметру. Для этого воспользуемся формулой (4), описанной в статье [8]. Найдём значения весовых коэффициентов для каждого из покупателей. Для первого покупателя: $w_1 = \frac{40}{40+3+1} \approx 0.91$, для второго покупа-

Значения ФСО продавца-заявителя в виде нечётких чисел отображены в таблице 2.

Для покупателей характеристики спроса зададим с помощью аналогичных функций принадлежности. Соответствующие значения отображены в таблице 3.

теля: $w_2 = \frac{3}{40+3+1} \approx 0.07$, для третьего покупателя: $w_3 = \frac{1}{40+3+1} \approx 0.02$. Код программы, реализующей нахождение значений весовых коэффициентов, а также формулу (4) представлен на рисунке 10.

```
def general_demand(weights, funcs, customers_count, parameters_count):
    mus = []
    temp_list = np.transpose(funcs)
    for i in range(parameters_count):
        mu = {}
        temp = temp_list[i]
        for j in range(customers_count):
            for k in temp[j]:
                if mu.get(k) is None:
                    mu[k] = 0
                mu[k] += temp[j][k] * weights[j]
            mus.append(mu)
    return mus
```

Рисунок 10. Функция для нахождения весовых коэффициентов и значений функций принадлежности обобщённого покупательского спроса

Figure 10. A function for finding the weighting coefficients and values of the membership functions of generalized consumer demand

Далее найдём границы и функции принадлежности компонент нечёткого вектора предложений продавца, одновременно удовлетворяющих обобщённому спросу и ФСО по формулам (5)-(7), описанных в статье [8]. Реа-

лизация соответствующей функции представлена на рисунке 11.

Графики функций принадлежности ФСО продавца, обобщённого спроса и их пересечения представлены на рисунках 12-15.

```
def general_demand_and_fso(demands, fso):
    result = []
    for i in range(len(fso)):
        temp_dict = {}
        for j in range(len(fso[i])):
            temp_dict[list(demands[i].keys())[j]] = min(list(fso[i].values())[j],
                                                         list(demands[i].values())[j])
        result.append(temp_dict)
    return result
```

Рисунок 11. Функция для нахождения пересечения ФСО продавца и обобщённого покупательского спроса

Figure 11. Function for finding the intersection of the seller's FSO and generalized customer demand



Рисунок 12. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО продавца по параметру «Рейтинг товара»

Figure 12. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the seller's FSO according to the "Product rating" parameter

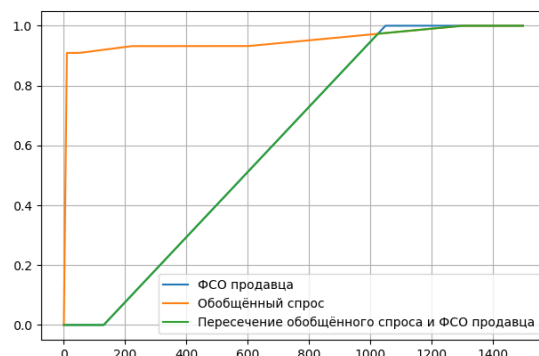


Рисунок 13. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО продавца по параметру «Количество отзывов»

Figure 13. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the seller's FSO according to the parameter "Number of reviews"

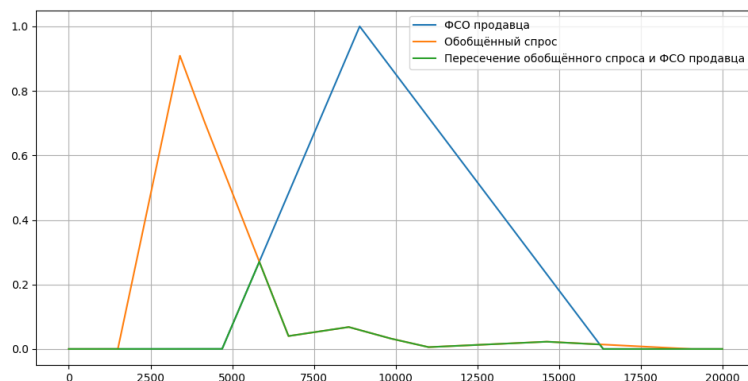


Рисунок 14. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО продавца по параметру «Начальная цена»

Figure 14. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the seller's FSO according to the "Initial price" parameter

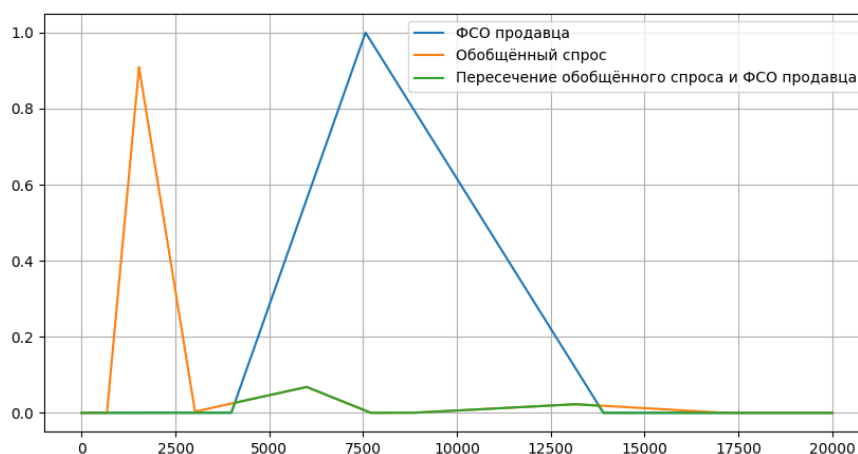


Рисунок 15. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО продавца по параметру «Цена со скидкой»

Figure 15. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the seller's FSO according to the "Discounted price" parameter

Предположим, продавец-заявитель предлагает три товара (стратегии) с параметрами, записанными в виде следующих векторов:

$$q_1 = (4.7; 312; 18600; 11300),$$

$$q_2 = (4.4; 197; 5600; 2150),$$

$$q_3 = (5; 1; 14900; 13200).$$

В таком случае, подставляя соответствующие координаты в функции принадлежности, находим локальные соответствия. Получается, для первой стратегии: (0.57; 0.2; 0; 0.13), для второй стратегии: (0.14; 0.07; 0; 0), для третьей стратегии: (1; 0; 0.02; 0.02).

Для определения из уравнения (10), описанного в статье [8], значения λ , зададим коэффициенты важности параметров товара рав-

ными $\varphi_1 = 0.75$, $\varphi_2 = 0.8$, $\varphi_3 = 0.2$, $\varphi_4 = 1$. Агрегируем полученные локальные соответствия с помощью интеграла Шоке, по формулам (9)-(11), также описанным в статье [8]. В результате получаем вероятности сделки для продавца-заявителя по каждому из товаров: $p_1 = 0.47$, $p_2 = 0.12$, $p_3 = 0.76$.

Значения параметров, характеризующих функционально-стоимостные ограничения (ФСО) обобщённого продавца того же однородного товара, зададим с помощью тех же функций принадлежности, что и для продавца-заявителя. Предположим, что ФСО обобщённого продавца соответствуют значениям, представленным в таблице 3.

Таблица 3. ФСО обобщённого продавца, заданные в виде соответствующих нечётких чисел

Table 3. The FSO of the generalized seller, given in the form of corresponding fuzzy numbers

Рейтинг товара / Product rating		Кол-во отзывов / Number of reviews		Начальная цена / Initial price			Цена со скидкой / Discounted price		
α	β	α	β	α	m	β	α	m	β
3.8	5	120	900	6000	11500	17600	3000	6750	8800

Для покупателей характеристики спроса оставим без изменений.

Найдём границы и функции принадлежности компонент нечёткого вектора предложений обобщённого продавца, одновременно

удовлетворяющих обобщённому спросу и ФСО. Графики функций принадлежности пересечения обобщённого спроса и ФСО обобщённого продавца представлены на рисунках 16-19.



Рисунок 16. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО обобщенного продавца по параметру «Рейтинг товара»

Figure 16. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the FSO of the generalized seller according to the "Product rating" parameter

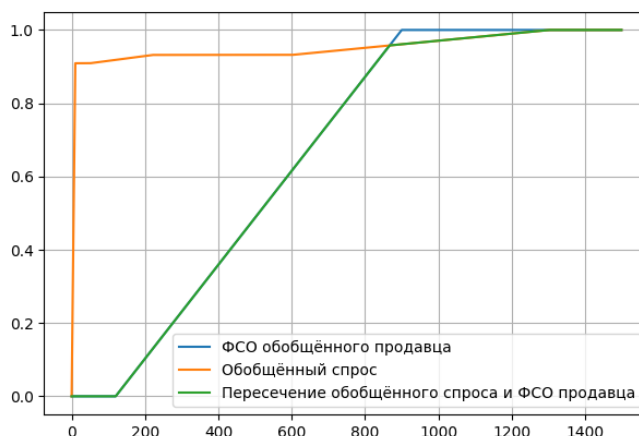


Рисунок 17. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО обобщенного продавца по параметру «Количество отзывов»

Figure 17. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the generalized seller's FSO according to the parameter "Number of reviews"

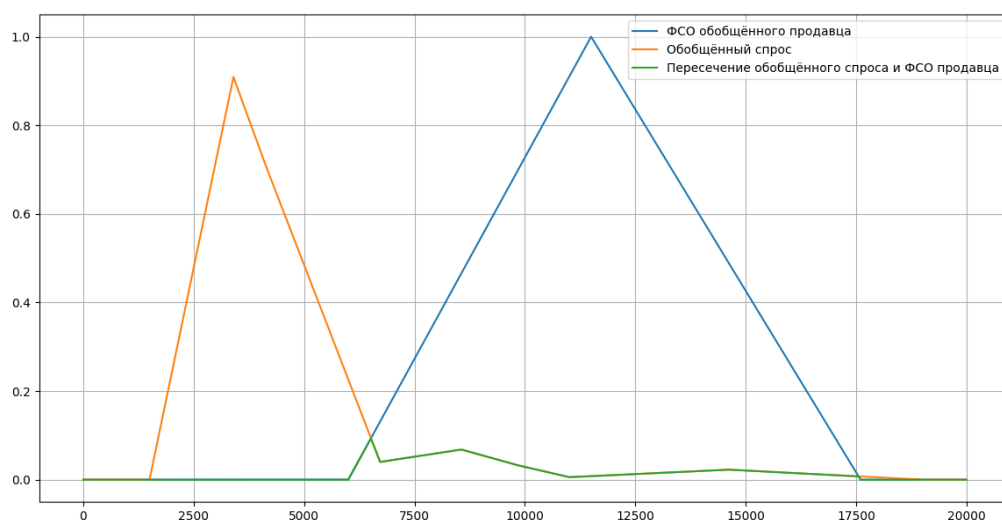


Рисунок 18. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО обобщенного продавца по параметру «Начальная цена»

Figure 18. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the generalized seller's FSO according to the "Initial price" parameter

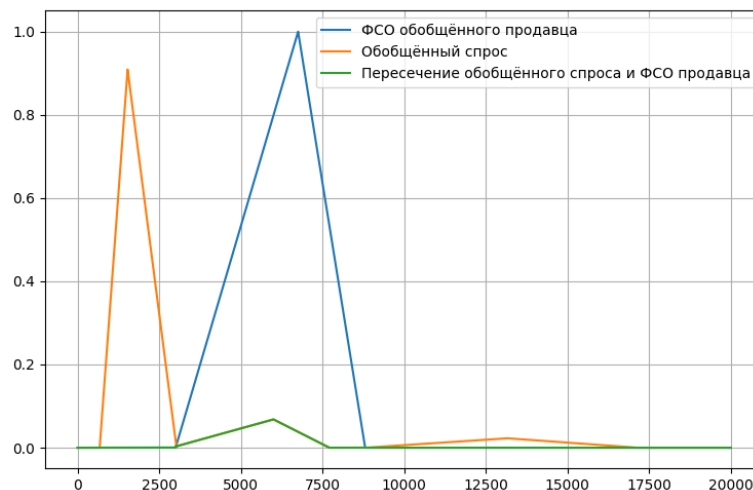


Рисунок 19. Графическое представление функций принадлежности пересечения обобщенного спроса и ФСО обобщенного продавца по параметру «Цена со скидкой»

Figure 19. Graphical representation of the membership functions of the intersection of generalized demand and the generalized seller's FSO according to the "Discounted price" parameter

Для определения стратегий обобщенного продавца воспользуемся информацией, полученной в результате парсинга категорий товаров на маркетплейсе Wildberries. Разобьем данные на 3 группы, каждая из которых будет представлять определенную стратегию обобщенного продавца, и затем с помощью среднего арифметического рассчитаем значения соответствующих характеристик.

Таким образом, получаем следующие стратегии обобщенного продавца: $q_1 = (4.5; 811; 7910; 3390)$, $q_2 = (3.5; 166; 10236; 3816)$, $q_3 = (3.4; 121; 11203; 5468)$.

Коэффициенты важности параметров товара также оставим без изменений. Найдём локальные соответствия и агрегируем их с помощью интеграла Шоке аналогичным образом, как находили значения для одного продавца-заявителя. В итоге получаем локальные соответствия для первой стратегии: (0.46; 0.89; 0.06; 0.01), для второй стратегии: (0; 0.06; 0.02; 0.02), для третьей стратегии: (0; 0.001; 0.007; 0.06) и вероятности сделки для обобщенного продавца: $p_1 = 0.478$, $p_2 = 0.05$, $p_3 = 0.06$.

Для продавца-заявителя найдём значения функции (15), описанной в статье [8], которые подставляются в качестве его выигрышей в биматрицу. В нашем случае биматричная игра примет вид:

$$\begin{pmatrix} q_1 & \hat{q}_1 & \hat{q}_2 & \hat{q}_3 \\ q_2 & (0.1; 0.78) & (0.47; 0.05) & (0.47; 0.06) \\ q_3 & (0.03; 0.78) & (0.12; 0.05) & (0.12; 0.06) \\ q_3 & (0.16; 0.78) & (0.76; 0.05) & (0.76; 0.06) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Разобьем полученную биматричную игру на две обычные матричные игры с нулевой суммой и рассмотрим матрицы 3×3 . Найдём

решение матричной игры в смешанных стратегиях для продавца-заявителя и обобщенного продавца: выполним замены, составим задачу линейного программирования и системы ограничений так же, как описано в статье [8].

$$F = x_1 + x_2 + x_3 \rightarrow \max, \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0.1x_1 + 0.47x_2 + 0.47x_3 \leq 1, \\ 0.03x_1 + 0.12x_2 + 0.12x_3 \leq 1 \\ 0.16x_1 + 0.76x_2 + 0.76x_3 \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0.78x_1 + 0.78x_2 + 0.78x_3 \leq 1, \\ 0.05x_1 + 0.05x_2 + 0.05x_3 \leq 1 \\ 0.06x_1 + 0.06x_2 + 0.06x_3 \leq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Решение задачи для, при целевой функции (2) и системе ограничений (3) будет выглядеть следующим образом: $x_1 = 6.25$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$. Тогда цена игры для продавца-заявителя будет равняться: $v = \frac{1}{x_1 + x_2 + x_3} = \frac{1}{6.25} = 0.16$.

Подставляя соответствующие полученные значения иксов в систему (3), можно сделать вывод о том, что продавцу-заявителю следует выбрать третью стратегию (т.е. продавать третий товар).

Аналогичным образом решение задачи для, при целевой функции (2) и системе ограничений (4) будет выглядеть следующим образом: $x_1 = 1.282$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$. Тогда цена игры для обобщенного продавца будет равняться: $v = \frac{1}{x_1 + x_2 + x_3} = \frac{1}{1.282} \approx 0.78$. Подставляя соот-

ветствующие полученные значения иксов в систему (4), можно сделать вывод о том, что вероятнее всего обобщенный продавец будет реализовывать первую стратегию.

Выводы

Таким образом, в результате данной работы был реализован парсер для сбора данных со страниц категорий товаров маркетплейса Wildberries, а также полученные данные применены для поддержки принятия решений продавца на маркетплейсе в условиях конкуренции. Разработанный парсер осуществляет:

— сбор данных с нескольких страниц любой выбранной категории товаров на Wildberries, которые можно будет использовать для построения дальнейшей научной модели;

— сохранение данных в удобочитаемом формате.

В частности, были получены вероятности сделки для продавца-заявителя по каждому из его товаров, основываясь на ФСО данного продавца и обобщённом покупательском спросе. Также на основе полученных в результате парсинга данных были составлены стратегии для обобщённого продавца на маркетплейсе и составлена теоретико-игровая модель выбора предложения продавца на маркетплейсе в условиях конкуренции.

Литература

1. Статистика маркетплейсов России [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://inclient.ru/marketplaces-stats/#lwptoc1>
2. Что такое парсинг [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.rush-analytics.ru/blog/chto-takoe-parser>
3. Сбор данных из открытых источников [Электронный ресурс] Режим доступа: https://mipt-stats.gitlab.io/courses/ad_fivt/data_parsing.html
4. Стандартная библиотека Python 3: справочник с примерами, 2-е изд.: Пер. с англ. – СПб.: ООО “Диалектика”, 2019. – 1376 с.
5. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 167 с
6. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – пер. с англ. / 4-е изд., электрон. – М.: Лаборатория знаний, 2020. – 801 с.
7. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
8. Матвеев М.Г., Алейникова Н.А., Титова М.Д. Технология поддержки принятия решений продавца на маркетплейс в условиях конкуренции // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 2. С. 7 – 20.

References

1. Statistics of Russian marketplaces [Electronic resource] Access mode: <https://inclient.ru/marketplaces-stats/#lwptoc1>
2. What is parsing [Electronic resource] Access mode: <https://www.rush-analytics.ru/blog/chto-takoe-parser>
3. Data collection from open sources [Electronic resource] Access mode: https://mipt-stats.gitlab.io/courses/ad_fivt/data_parsing.html
4. The Python 3 Standard Library: a reference book with examples, 2nd ed.: Translated from English – St. Petersburg: Dialektika LLC, 2019. – 1376 p.
5. Zadeh, L. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions / L. Zadeh. – M.: Mir, 1976. – 167 p.
6. Pegat, A. Fuzzy modeling and control / A. Pegat. – translated from English / 4th ed., electron. – M.: Laboratory of Knowledge, 2020. – 801 p.
7. Leonenkov, A.V. Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH / A.V. Leonenkov. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005. – 736 p.
8. Matveev M.G., Aleynikova N.A., Titova M.D. Technology of decision support for the seller on the marketplace in competitive conditions // Business Informatics. 2023. Vol. 17. No. 2. pp. 7-20.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Часовских Игорь Анатолевич	студент – магистр, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», i_chasovskih03@mail.ru
Матвеев Михаил Григорьевич	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», заведующий кафедрой «Информационные технологии управления», mgmatveev@yandex.ru ORCID: 0000-0002-6528-6420

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Chasovskikh Igor Anatolyevich	Master's student, Voronezh State University, i_chasovskih03@mail.ru
Matveev Mikhail Grigorievich	Dr. Sci. (Techn.), professor, Voronezh State University, head of the department of Management Information Technologies, mgmatveev@yandex.ru ORCID: 0000-0002-6528-6420

статья поступила в редакцию 01.03.2025	одобрена после рецензирования 12.03.2025	принята к публикации 25.03.2025
the article was submitted 01.03.2025	approved after reviewing 12.03.2025	accepted for publication 25.03.2025

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ИНЦИДЕНТОВ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Алик Артакович Авакян	¹	alik.avakyan@gmail.com
Дмитрий Анатольевич Литвинов	¹	d77013378@yandex.ru
Людмила Анатольевна Коробова✉	¹	Lyudmila_korobova@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В условиях стремительно развивающегося информационного общества, где программное обеспечение играет центральную роль в функционировании большинства сфер деятельности, инциденты, возникающие в процессе разработки, эксплуатации и поддержания программных продуктов, могут существенно повлиять на результативность бизнеса и его репутацию. Ошибки в программном обеспечении (ПО) могут проявляться в самых разных формах, начиная от незначительных багов и заканчивая катастрофическими сбоями, которые приводят к утечкам данных или нарушению работы критически важных систем.

Ключевые слова: инциденты в программировании, диагностика ошибок, автоматизация тестирования, систематизация инцидентов, методы решения проблем, качество программного обеспечения.

Для цитирования: Авакян А. А., Литвинов Д. А., Коробова Л. А. Систематизация инцидентов программного обеспечения // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 104-108.

Original article

SYSTEMATIZATION OF SOFTWARE INCIDENTS

Alik A. Avakyan	¹	alik.avakyan@gmail.com
Dmitry A. Litvinov	¹	d77013378@yandex.ru
Lyudmila A. Korobova✉	¹	Lyudmila_korobova@mail.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. In the context of a rapidly developing information society, where software plays a central role in the functioning of most areas of activity, incidents that arise during the development, operation and maintenance of software products can significantly affect the performance of a business and its reputation. Software errors can manifest themselves in a variety of forms, ranging from minor bugs to catastrophic failures that lead to data leaks or disruption of critical systems.

Keywords: programming incidents, error diagnostics, testing automation, incident classification, problem solving methods, software quality.

For citation: Avakyan A. A., Litvinov D. A., Korobova L. A. Systematization of software incidents. *Ingenernye tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 104-108. (In Russ.).

Введение

Статья посвящена систематизации инцидентов, возникающих в программных продуктах, и анализу путей их решения. Рассмотрены типы инцидентов, проанализированы основные причины их возникновения и предложены эффективные способы предотвращения и устранения подобных инцидентов в будущем. В статье рассмотрены методологии для анализа инцидентов, средства автоматизации для диагностики и устранения ошибок, а также приведены примеры из практики крупной ИТ-компании.

Цель работы — предложить методы и подходы, способствующие улучшению качества программного обеспечения и снижению вероятности возникновения инцидентов. В исследовании будет сделан акцент на современных методах и инструментах, таких как авто-

матизация тестирования, использование искусственного интеллекта в диагностике ошибок и интеграция инструментов мониторинга и быстрого реагирования на инциденты.

Программное обеспечение (ПО) стало неотъемлемой частью в жизни человека и важнейшей составляющей множества сфер, включая здравоохранение, образование, финансы и государственное управление. С каждым годом объем и сложность программных продуктов увеличиваются, что ведет к возрастанию числа ошибок, так называемых инцидентов, которые могут значительно повлиять на функционирование ПО. Инцидент в ИТ-сфере можно определить как свершившееся событие (факт нарушения), которое вносит непредвиденную остановку функционирования программных продуктов или любых информационных ресурсов. Неважно, когда произошло это со-

бытие, но оно приводит к снижению качества предоставляемых ИТ-компаниями услуг.

Материалы и методы исследования

Инциденты в ПО можно определить как любое событие, которое нарушает нормальное функционирование системы или влияет на ее производительность [1, 2]. В зависимости от природы инцидента, его последствия могут варьироваться от незначительных замедлений в работе до серьезных потерь данных или отказов систем. Ошибки могут быть как предсказуемыми (например, баги, выявленные в процессе тестирования), так и неожиданными (непроизводственные сбои, вызванные, например, внешними факторами).

Поэтому систематизация инцидентов, возникающих в процессе разработки, тестирования и эксплуатации ПО, является первым этапом в подборе методов анализа инцидентов [2, 3]. Далее будут предложены пути снижению вероятности возникновения инцидентов и оптимизации функционирования ПО на всех этапах жизненного цикла. Таким образом, задача предотвращения и устранения инцидентов в работе любого программного обеспечения является актуальной.

Решение задачи систематизации инцидентов включает в себя следующий набор подзадач.

1. Анализ типов инцидентов и причин их возникновения.
2. Изучение современных методов диагностики и тестирования для своевременного выявления и устранения ошибок.
3. Разработка подходов и рекомендаций для предотвращения инцидентов в будущем.
4. Оценка эффективности использования автоматизации процессов для улучшения качества ПО и снижения количества инцидентов.

Рассмотрим методы, с помощью которых будет выполняться анализ ПО для структурирования проблем. Для исследования причин появления инцидентов в ПО и выявления закономерностей их возникновения используют следующие приемы и методы:

- а) классификация по типу ошибок;
- б) метод экспертных оценок;
- в) метод кейс-стадий (case study);
- г) статистический метод.

Анализ инцидентов через классификацию типов ошибок. Одним из наиболее эффективных подходов является классификация инцидентов по типам ошибок, которые могут возникать в процессе разработки ПО [4]. Существует несколько ключевых типов ошибок.

Условно возникающие ошибки можно разделить на пять групп.

Группа ошибок 1: классифицируются ошибки, возникающие из-за неправильной реализации алгоритмов - группа ошибок логики.

Группа ошибок 2: собираются ошибки, связанные с некорректным использованием языков программирования - ошибки синтаксиса.

Группа ошибок 3: здесь аккумулируются проблемы, связанные с интеграцией различных компонентов системы - ошибки взаимодействия.

Группа ошибок 4: отнесены ошибки, связанные с безопасностью (уязвимостью), которые могут быть использованы для взлома системы - ошибки безопасности.

Группа ошибок 5: систематизированы случаи, когда приложение или система работают слишком медленно из-за неоптимизированного кода - проблемы с производительностью.

Каждый из этих типов инцидентов требует индивидуального подхода к решению, и эффективная диагностика и устранение проблем возможны только при точной классификации типа ошибки [5]. Дадим краткую характеристику каждому *методу исследования инцидентов*.

Метод экспертных оценок. Для систематизации инцидентов и выявления причин их возникновения была использована методика экспертных оценок [6, 7]. Экспертные интервью проводились с профессионалами из крупных ИТ-компаний, которые делились опытом выявления и устранения инцидентов в их проектах.

Метод кейс-стадий (case study). Особенностью метода является привлечение экспертов из области информационных технологий с целью проработки ситуационных экспериментов "case study". В качестве реальных примеров, были выбраны инциденты, возникавшие в известных на рынке ИТ-компаниях (Google Microsoft, Amazon). Был предложен ряд ситуаций, возникавших при функционировании названных компаний ИТ-профиля. Проанализирован опыт этих компаний при решении возникавших проблем. Были выявлены закономерности при возникновении инцидентов. Как итог - был выбран лучший вариант решения по устранению подобных инцидентов и даны объяснения возможного появления инцидентов [5, 6].

Статистический метод. Программные продукты широко используются в любой сфере деятельности производства и бизнеса. Вся коммуникация между предприятиями, компаниями и организациями построена на основе кроссплатформенных приложений, сайтов,

корпоративных порталах, торговых и интернет-ресурсах и др. Функциональности и скорости работы всевозможных веб-технологий, в основе которых лежит программное обеспечение, уделяется огромное значение. Статистический анализ кода ПО используют для поиска инцидентов, определения слабых мест в ПО, его уязвимости [7-9]. Метод статистического анализа получил название так называемого метода белого ящика.

При статистическом исследовании кода ПО проведена классификация причин, приводящих к возникновению инцидентов [11, 12]. Причины распределены по характеру возникающих инцидентов, по воздействию на ПО и по природе их появления. Понимание причины инцидента важно с точки зрения необходимости срочности реагирования. К сбою в работе программного обеспечения двоякое отношение. Конечно, это прежде всего это создание критической ситуации, которую как можно скорее необходимо устранить. Но с другой стороны, раз возникает такая ситуация, значит есть причины, которые и создают сбой в работе. Т.е., инцидент является толчком или стимулом к поиску решения для доработки и модернизации программного продукта.

Результаты исследования и их обсуждение

Практическое применение приведенной методологии для типов инцидентов рассмотрим на примере ИТ-компании «Северсталь-инфоком».

Инциденты, в данной компании, градируются по приоритетам:

1. Низкий – служебные работы по тестированию инцидентов. В основном, это работы от ИТ специалиста –ИТ специалисту.

2. Средний – работы, которые требуют выполнения в определенный промежуток времени.

3. Высокий – работы, которые требуют скорейшего выполнения.

4. Критический – виды инцидентов, которые должны быть устранены как можно скорее, поскольку могут повлиять на работоспособность важного программного обеспечения, которое при неисправности может грозить бизнес-единице финансовыми потерями.

За период 01.02.2025 – 23.02.2025 было выявлено 1583 инцидентов: критичный – 100, высокий – 540, средний – 781, низкий – 162. На рисунке 1 представлено графическое представление численных значений инцидентов в пересчете на проценты.

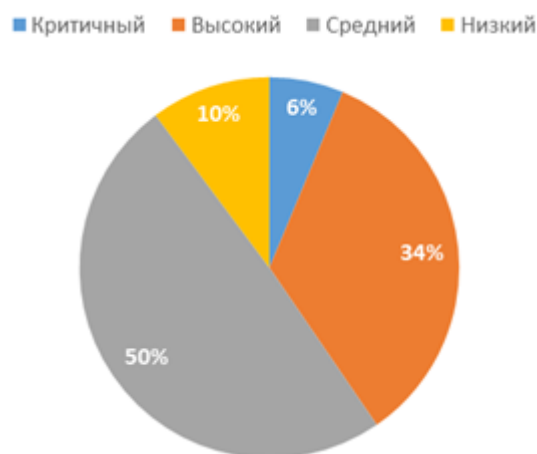


Рисунок 1. Процентное сопоставление градации инцидентов в ИТ-компании

Figure 1. Percentage comparison of incident grading in an IT company

Для систематизации инцидентов по разному программному обеспечению, были выполнены мероприятия по созданию общего шаблона их обработки – первичная диагностика.

Поскольку программного обеспечения много, и нужно придумать универсальный метод решения проблем, приложения были разделены на сервисы.

Если рассмотреть сервис «пользовательское ПО десктопное», то получим следующую первичную диагностику.

- 1) С чем связано обращение пользователя?
- 2) Проверка наличия ПО в OLA (соглашение с пользователем об уровне сервиса).
- 3) Доступ к ПО прописан?
- 4) Персональный компьютер (ПК) работает стабильно?
- 5) Выполнить перезагрузку ПК.
- 6) Установлены ли обновления на ПК пользователя?
- 7) Есть ли проблемы с установкой обновлений?
- 8) В ПО не работают надстройки?
- 9) Проблемы с печатью из ПО?
- 10) На каком этапе работы ошибка (при запуске/внутри ПО).
- 11) Проблема возникает при работе со всеми файлами?

Во время обработки инцидентов было, согласно первичной диагностике, в рамках первой линии технической поддержки было выполнено 869 инцидентов, остальные были переквалифицированы на вышестоящие линии технической поддержки, что способствует ускорению поиска необходимого решения каждого случая.

Заключение

Таким образом, систематизация инцидентов играет ключевую роль в быстром выявлении и устранении ошибок, а также в предотвращении повторных инцидентов. Автоматизация процессов тестирования и мониторинга значительно повышает качество программного обеспечения и уменьшает вероятность возникновения инцидентов. Методологии DevOps, определяющая культуру разработки, и инте-

грация разработки и эксплуатации позволяют эффективно решать проблемы и повышать скорость реагирования на инциденты. Применение инструментов анализа больших данных и статистики позволяет выявлять закономерности и прогнозировать потенциальные проблемы в программных системах. Всё, выше перечисленное, позволяет значительно повысить стабильность и безопасность программного обеспечения.

Литература

1. Sommerville, I. (2011). Software Engineering (9th ed.). Addison-Wesley.
2. Pressman, R. S. (2014). Software Engineering: A Practitioner's Approach (8th ed.). McGraw-Hill.
3. Fitzgerald, B., & Stol, K. J. (2017). "Continuous Software Engineering: A".
4. Boehm, B. W. (1988). "A Spiral Model of Software Development and Enhancement." ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 11(4), 14-24.
5. Пименова, Л. В. Оптимизация рабочего времени персонала на примере SAP MASTER DATA GOVERNANCE / Л. В. Пименова, Ю. В. Бугаев, Л. А. Коробова // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение : Сборник научных статей и докладов VI Международной научно-практической конференции, Воронеж, Воронеж: РИТМ, 2019. – С. 616-620. – EDN YRUJOK.
6. Пименова, Л. В. Оптимизация работы ИТ-менеджера в структуре SAP / Л. В. Пименова, Ю. В. Бугаев, Л. А. Коробова // Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник статей VIII национальной научно-практической конференции с международным участием, Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2020. – С.153-158. – EDN GREIRH.
7. Кейс-стадии: задачи и преимущества [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://dasreda.ru/media/marketing/kejs-stadi/> (Дата обращения 27.02.2025)
8. Статический анализ кода: как работает и для чего применяется [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: https://rt-solar.ru/products/solar_appscreener/blog/2402/ (Дата обращения 27.02.2025)
9. Применение методов анализа исходного кода при оценке защищенности информационных систем [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://www.ussc.ru/news/novosti/> (Дата обращения 27.02.2025)
10. Якименко К. В., Жукова М. Н. Создание методологии обнаружения инцидентов информационной безопасности // Решетневские чтения. 2013. №17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozdanie-metodologii-obnaruzheniya-incidentov-informatsionnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 27.02.2025).
11. Зефилов Сергей Львович, Щербакова Анастасия Юрьевна Оценка инцидентов информационной безопасности // Доклады ТУСУР. 2014. №2 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-incidentov-informatsionnoy-bezopasnosti> (дата обращения: 27.02.2025).
12. Герасев С.В., Елизарова Н.Н. Информационная система анализа статистики угроз, поступающих через USB-устройства // Научное обозрение. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 10-14; URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1469> (дата обращения: 28.02.2025).

References

1. Sommerville, I. (2011). Software Engineering (9th ed.). Addison-Wesley.
2. Pressman, R. S. (2014). Software Engineering: A Practitioner's Approach (8th ed.). McGraw-Hill.
3. Fitzgerald, B., & Stol, K. J. (2017). "Continuous Software Engineering: A".
4. Boehm, B. W. (1988). "A Spiral Model of Software Development and Enhancement." ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 11(4), 14-24.
5. Pimenova, L. V. Optimization of staff working hours on the example of SAP MASTER DATA GOVERNANCE / L. V. Pimenova, Yu. V. Bugaev, L. A. Korobova // Food safety: scientific, personnel and information support : Collection of scientific articles and reports of the VI International Scientific and Practical Conference, Voronezh, Voronezh: RHYTHM, 2019. – PP. 616-620. – EDN YRUJOK.
6. Pimenova, L. V. Optimization of the IT manager's work in the SAP structure / L. V. Pimenova, Yu. V. Bugaev, L. A. Korobova // Modeling of energy information processes: Collection of articles of the VIII

National Scientific and Practical Conference with international participation, Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2020. – pp. 153-158. – EDN GREIRH.

7. Case stages: tasks and advantages [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://dasreda.ru/media/marketing/kejs-stadi/> (Accessed 02/27/2025)

8. Static code analysis: how it works and what it is used for [Electronic resource] / Title from the screen // URL: https://rt-solar.ru/products/solar_appscreener/blog/2402/ (Date of conversion 02/27/2025)

9. Application of source code analysis methods in assessing the security of information systems [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://www.ussc.ru/news/novosti/> (Accessed 02/27/2025)

10. Yakimenko K. V., Zhukova M. N. Creation of a methodology for detecting information security incidents // Reshetnev readings. 2013. No. 17. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sozдание-metodologii-obnaruzheniya-intsidentov-informatsionnoy-bezopasnosti> (date of application: 02/27/2025).

11. Sergey Lvovich Zefirov, Anastasia Yurievna Shcherbakova Assessment of information security incidents // Reports of TUSUR. 2014. No. 2 (32). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-intsidentov-informatsionnoy-bezopasnosti> (date of access: 02/27/2025).

12. Gerasev S.V., Elizarova N.N. Information system for analyzing threat statistics received via USB devices // Scientific Review. Technical sciences. – 2024. – No. 3. – pp. 10-14; URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1469> (date of request: 02/28/2025).

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Авакян Алик Артакович	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистрант кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, alik.avakyan@gmail.com
Литвинов Дмитрий Анатолевич	кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, d77013378@yandex.ru SPIN-код 8901-7494
Коробова Людмила Анатолевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Avakyan Alik Artakovich	master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, master's student of the Department of information technology, modeling and management, alik.avakyan@gmail.com
Litvinov Dmitry Anatolyevich	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the Department of information technology, modeling and management, d77013378@yandex.ru SPIN-code 8901-7494
Korobova Lyudmila Anatolyevna	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the Department of information technology, modeling and management, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X

статья поступила в редакцию 03.03.2025	одобрена после рецензирования 13.03.2025	принята к публикации 25.03.2025
the article was submitted 03.03.2025	approved after reviewing 13.03.2025	accepted for publication 25.03.2025

КЛИЕНТ-СЕРВЕРНЫЙ ПОДХОД В ПРОЕКТИРОВАНИИ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ АВТОРСКОГО КОНТЕНТА ОТ НЕЗАКОННОГО КОПИРОВАНИЯ

Елена Алексеевна Хромых[✉] ¹ helen_hrom@mail.ru
Игорь Юрьевич Андросов ¹ igorandrosov2002@gmail.com

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Внедрение надежных методов защиты авторского контента от незаконного распространения в компаниях, предоставляющих учебные материалы, снижает финансовые потери и повышает конкурентоспособность. Данная работа посвящена проектированию системы защиты информации на основе встраивания водяных знаков с использованием клиент-серверной архитектуры. Для моделирования системы применены нотации Integration Definition for Function Modeling (IDEF0) и Data Flow Diagram (DFD), позволяющие определить функциональные модули, потоки данных и требования к пользовательскому интерфейсу. Разработанная модель отражает структуру хранения данных, механизмы защиты и алгоритмы обнаружения попыток обхода защиты. Особое внимание уделено анализу целостности веб-страницы, содержащей защищенный контент. Разработан алгоритм, фиксирующий нарушения в структуре страницы на основе экспертно определенной системы признаков, с последующей регистрацией инцидентов в базе данных. Данный подход позволяет выявлять попытки обхода защиты и повышает надежность системы. Представленная модель может быть использована для разработки комплексной системы защиты цифрового контента и внедрена в компаниях, предоставляющих авторский материал в сети Интернет.

Ключевые слова: функциональное проектирование, информационная система, защита информации, водяные знаки, автоматизированные системы безопасности

Для цитирования: Хромых Е. А., Андросов И. Ю. Клиент-серверный подход в проектировании методов защиты авторского контента от незаконного копирования // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 109-120.

Original article

CLIENT-SERVER APPROACH IN DESIGNING METHODS FOR PROTECTING COPYRIGHTED CONTENT FROM ILLEGAL COPYING

Elena A. Khromykh[✉] ¹ helen_hrom@mail.ru
Igor Yu. Androsov ¹ igorandrosov2002@gmail.com

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The implementation of reliable methods for protecting copyrighted content from illegal distribution in companies providing educational materials reduces financial losses and increases competitiveness. This study focuses on designing an information protection system based on embedding watermarks using a client-server architecture. The system modeling employs Integration Definition for Function Modeling (IDEF0, IDEF3) and Data Flow Diagram (DFD) to define functional modules, data flows, and user interface requirements. The developed model represents the data storage structure, protection mechanisms, and algorithms for detecting bypass attempts. Particular attention is given to analyzing the integrity of the web page containing protected content. An algorithm has been developed to detect structural violations based on an expert-defined system of indicators, followed by incident logging in the database. This approach enhances the system's reliability by identifying attempts to circumvent protection. The proposed model can be applied to develop a comprehensive digital content protection system and implemented in companies that distribute copyrighted materials on the Internet.

Keywords: functional design, information system, product quality assessment

For citation: Khromykh E. A., Androsov I. Yu. Client-server approach in designing methods for protecting copyrighted content from illegal copying. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (1 (9)): 109-120. (In Russ.).

Введение

Современный уровень развития информационных технологий оказывает значительное влияние на способы распространения и защиты цифрового контента. В условиях роста объемов информации и увеличения числа онлайн-ресурсов, предоставляющих учебные ма-

териалы, защита авторских прав становится важной задачей.

Эффективная защита цифрового контента требует внедрения современных информационных систем (ИС), обеспечивающих контроль за распространением материалов и предотвращение их незаконного копирования.

Такие системы позволяют автоматизировать процессы защиты данных, отслеживать их использование и выявлять случаи нарушения авторских прав, что способствует снижению финансовых потерь и повышению конкурентоспособности образовательных платформ.

Правильно спроектированная система защиты контента позволяет минимизировать риски его нелегального распространения. Она должна обеспечивать надежную идентификацию владельца материалов, контроль целостности данных и отслеживание попыток обхода механизмов защиты. Для построения таких систем важно детально анализировать существующие угрозы и разрабатывать эффективные методы защиты.

Одним из распространенных методов защиты цифрового контента является использование водяных знаков, которые позволяют отслеживать происхождение материалов и фиксировать их незаконное распространение. Однако традиционные подходы к встраиванию водяных знаков подвержены ряду атак, направленных на их удаление или искажение. В связи с этим актуальной задачей является разработка системы встраивания и обнаружения водяных знаков с применением клиент-серверной архитектуры, обеспечивающей надежность защиты и возможность удаленного мониторинга использования контента [1].

Одним из ключевых элементов такой системы является механизм анализа целостности веб-страниц, содержащих защищенные материалы. Важно разработать алгоритмы, позволяющие выявлять попытки обхода защиты, регистрировать факты несанкционированного использования и фиксировать нарушения в базе данных.

В данной работе предлагается метод защиты цифрового контента, основанный на внедрении водяных знаков и мониторинге их наличия с использованием клиент-серверного подхода [2]. Для моделирования системы применяются нотации IDEF0 и DFD, позволяющие определить функциональные модули, потоки данных и структуру хранения информации [3, 4]. Разработанная модель позволит перейти к созданию комплексной системы защиты авторского контента в сети Интернет.

Материал и методы исследования

Для защиты авторского контента от незаконного копирования в компании, предоставляющей учебные материалы в сети Интернет, используется система мониторинга целостности контента с внедрением водяных знаков. В рамках этого исследования разработана система

защиты, основанная на клиент-серверной архитектуре, использующая алгоритмы для встраивания водяных знаков в видео и мониторинга их целостности. Деятельность системы регламентируется нормативными требованиями по защите авторского контента и цифровых прав.

Система защиты контента включает следующие этапы:

- анализ и встраивание водяных знаков в защищаемый контент (видео или другие материалы);
- мониторинг целостности контента, включая проверку на подмену, удаление или изменение водяных знаков;

- обработка нарушений и фиксация инцидентов, связанных с попытками обхода защиты;

Задача системы защиты — обеспечить мониторинг целостности защищенного контента и предотвращение несанкционированного копирования, путем регулярной проверки водяных знаков и данных о контенте, поступающих от пользователей. Внедрение такой системы позволяет повышать безопасность контента и улучшать защиту авторских прав.

Информационная система должна выполнять следующие функции:

- хранение данных о пользователях, доступах и логах нарушений;

- мониторинг целостности страниц, содержащих защищенный контент, с помощью динамических водяных знаков [5, 6];

- корректировка и обновление информации о состоянии контента и водяных знаков в базе данных;

- предоставление отчетов о попытках обхода системы защиты, выявленных нарушениях, а также о степени угрозы безопасности контента;

- поддержка принятия решения ЛПР (лицу, принимающему решение) по продолжению передачи контента или блокировке доступа при нарушениях.

В рамках исследования смоделирована предметная область защиты авторского контента для предприятия, предоставляющего видеоконтент или другие защищенные материалы. При моделировании использован клиент-серверный подход с применением технологий водяных знаков и мониторинга целостности. Структура модели системы защиты представлена на рисунке 1.

Контекстная диаграмма «Механизм защиты авторского контента» представлена на рисунке 2. Описание функциональных блоков и стрелок контекстной диаграммы «Контроль качества» приведено в таблицах 1 и 2 соответственно.

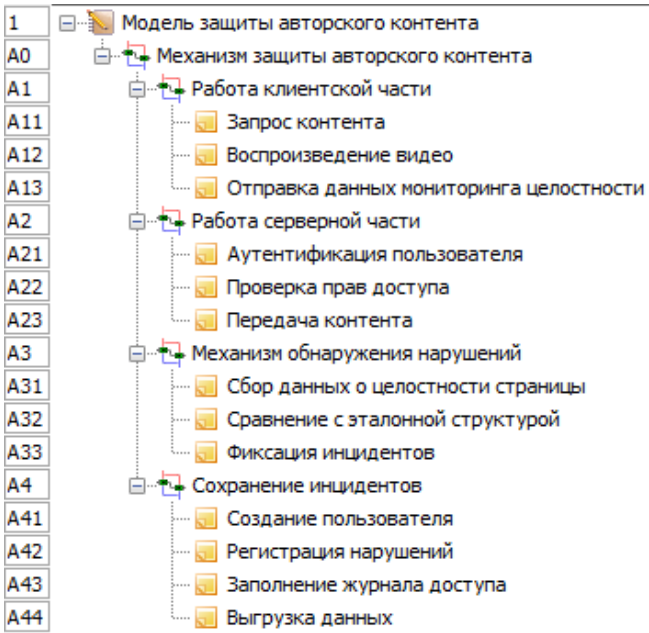


Рисунок 1. Структура модели «Механизм защиты авторского контента»

Figure 1. Structure of the "Copyright Protection Mechanism" model

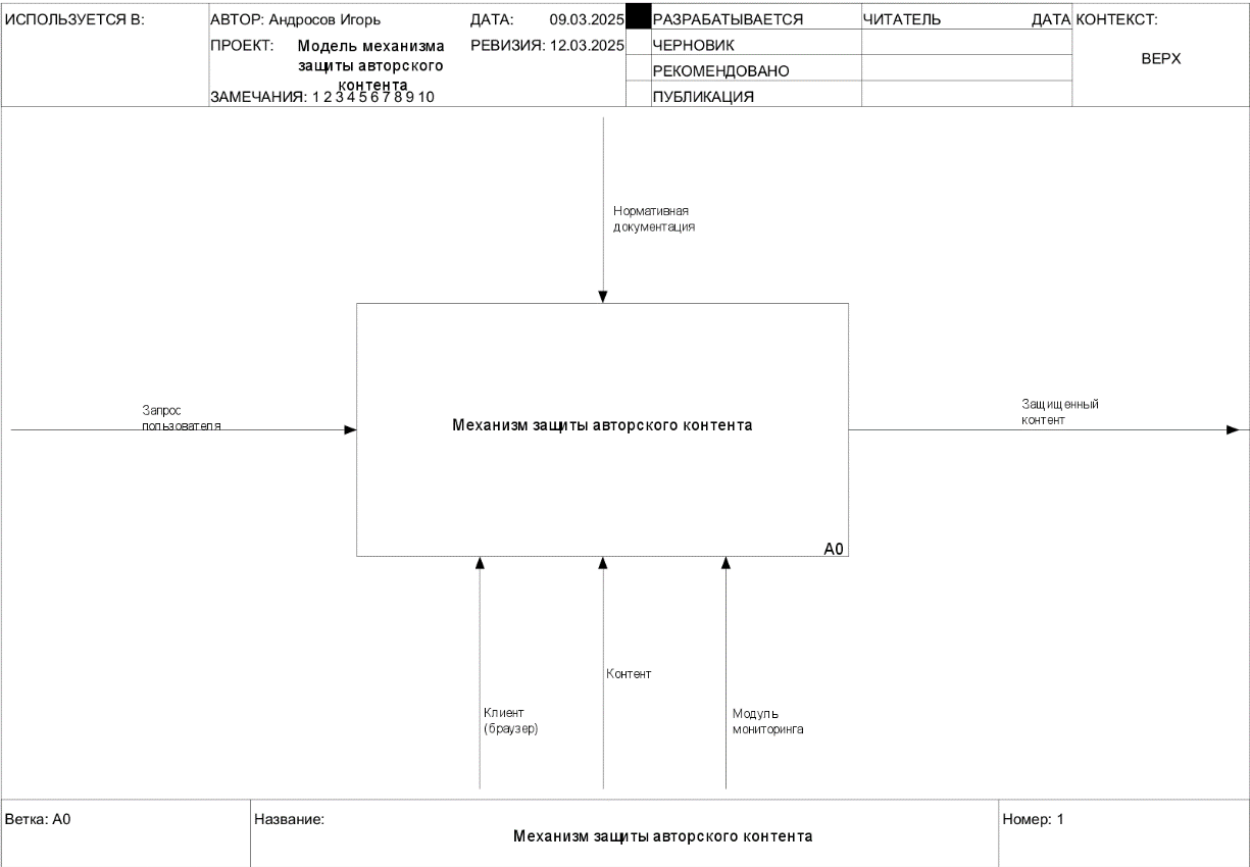


Рисунок 2. Контекстная диаграмма «Механизм защиты авторского контента»

Figure 2. Context diagram "Copyright protection mechanism"

Таблица 1. Описание функциональных блоков контекстной диаграммы «Механизм защиты авторского контента»

Table 1. Description of the functional blocks of the context diagram "Copyright protection Mechanism"

Название функционального блока / Name of the function block	Описание / Description
Механизм защиты авторского контента	Отдел контроля защиты авторского контента

Таблица 2. Описание стрелок контекстной диаграммы «Механизм защиты авторского контента»
Table 2. Description of the arrows in the context diagram "Copyright Protection Mechanism"

Название стрелки / Arrow name	Описание стрелки / Description of the arrow	Тип стрелки / Arrow Type
Запрос пользователя	Запрос от пользователя на доступ к защищенному контенту.	Вход
Нормативная документация	Информация о правилах и стандартах, регулирующих защиту контента и правомерность использования.	Управляющее воздействие
Клиент(браузер)	Устройство пользователя, через которое осуществляется доступ к защищенному контенту.	Механизм
Контент	Защищенные материалы (видео), доступные через систему.	Механизм
Модуль мониторинга	Компонент системы, отслеживающий целостность контента, включая водяные знаки, и фиксирующий нарушения.	Механизм
Защищенный контент	Контент, который подвергнут встраиванию водяных знаков и мониторингу целостности.	Выход

Контекстная диаграмма «Механизм защиты авторского контента» декомпозирована в диаграмму типа IDEF0, состоящую из 4-х объектов: работа клиентской части, работа серверной части, механизм обнаружения нарушений, сохранение результатов (рисунок 3).

Описание функциональных блоков и стрелок диаграммы декомпозиции «Механизм защиты авторского контента» приведено в таблицах 3 и 4 соответственно.

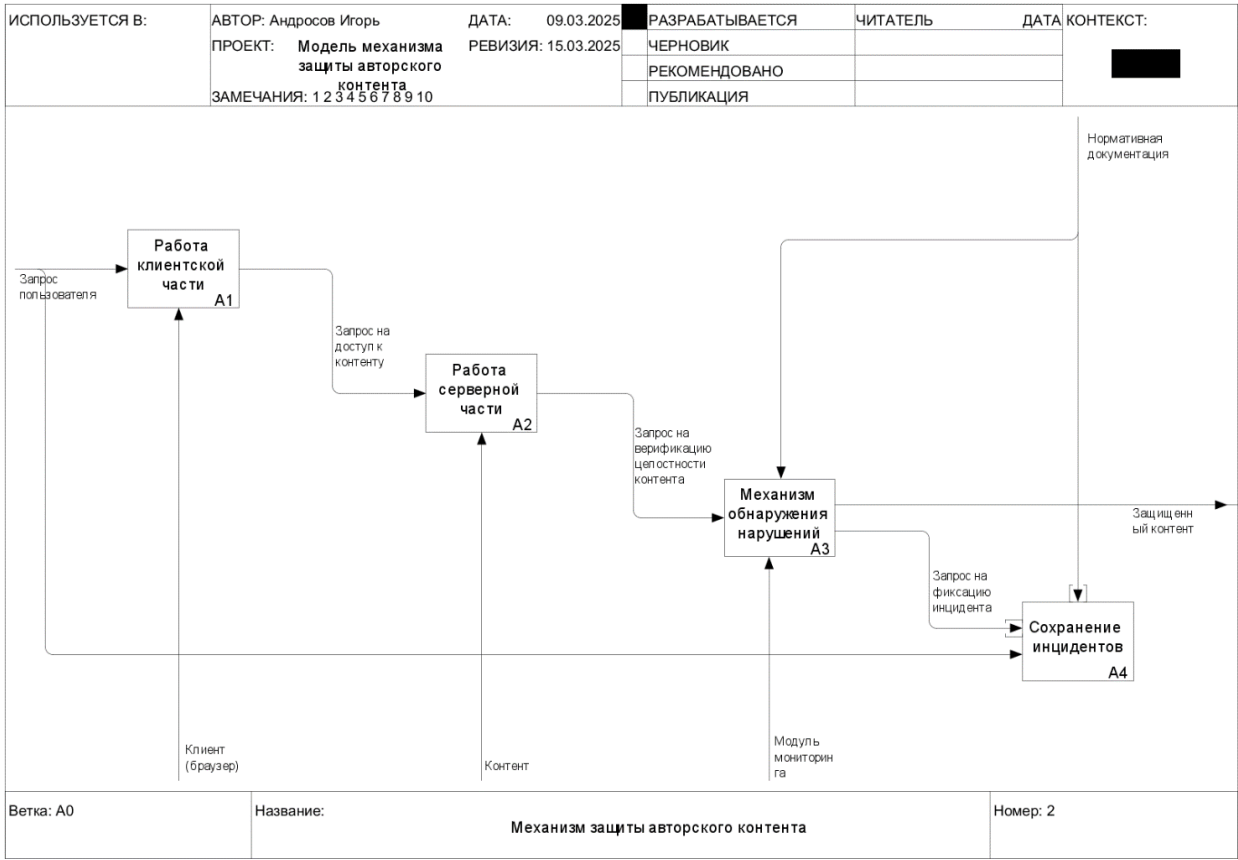


Рисунок 3. Декомпозиция диаграммы «Механизм защиты авторского контента»
Figure 3. Decomposition of the diagram "Copyright protection mechanism"

Таблица 3. Описание функциональных блоков диаграммы декомпозиции «Механизм защиты авторского контента»

Table 3. Description of the functional blocks of the decomposition diagram "Copyright Protection Mechanism"

Название функционального блока / Name of the function block	Описание / Description
Работа клиентской части	Обработка запросов пользователя и взаимодействие с сервером
Работа серверной части	Обработка запросов, управление доступом и защита контента
Механизм обнаружения нарушений	Анализ целостности контента и выявление попыток обхода защиты
Сохранение инцидентов	Регистрация инцидентов и сохранение данных о нарушениях в базе

Таблица 4. Описание стрелок диаграммы декомпозиции «Механизм защиты авторского контента»

Table 4. Description of the arrows of the decomposition diagram "Copyright protection mechanism"

Название стрелки / Arrow name	Начало стрелки / The beginning of the arrow	Тип начала стрелки / Arrow start type	Окончание стрелки / The end of the arrow	Тип окончания стрелки / Arrow end Type
Запрос пользо- вателя	Граница диаграммы	Управляющее воз- действие	Работа клиентской части	Вход
Нормативная доку- ментация	Граница диаграммы	Управляющее воз- действие (ветка стрелки)	Механизм обнару- жения нарушений Сохранение резуль- татов	Вход
Клиент (браузер)	Граница диаграммы	Механизм (ветка стрелки)	Работа клиентской части	Вход
Контент	Граница диаграммы	Механизм (ветка стрелки)	Работа серверной части	Вход
Модуль мониторин- га	Граница диаграммы	Механизм (ветка стрелки)	Механизм обнару- жения нарушений	Вход
Запрос на доступ к контенту	Работа клиентской части	Выход	Работа серверной части	Вход
Запрос на верифи- кацию целостности контента	Работа серверной части	Выход	Механизм обнару- жения нарушений	Вход
Запрос на фикса- цию инцидента	Механизм обнару- жения нарушений	Выход	Сохранение резуль- татов	Вход
Защищенный кон- тент	Механизм обнару- жения нарушений	Выход	Граница диаграммы	Выход

Следующим уровнем декомпозиции является выполненная в нотации IDEF0 диаграмма «Работа клиентской части», состоящая из 3-х блоков: запрос контента, воспроизведение видео, отправка данных мониторинга (рисунок 4).

Описание функциональных блоков и стрелок диаграммы декомпозиции «Работа клиентской части» приведено в таблицах 5 и 6 соответственно.

Следующим уровнем декомпозиции является выполненная в нотации IDEF0 диаграмма «Работа серверной части», состоящая из 3-х блоков: аутентификация пользователя, проверка прав доступа, передача контента (рисунок 5).

Описание функциональных блоков и стрелок диаграммы декомпозиции «Работа серверной части» приведено в таблицах 7 и 8 соответственно.

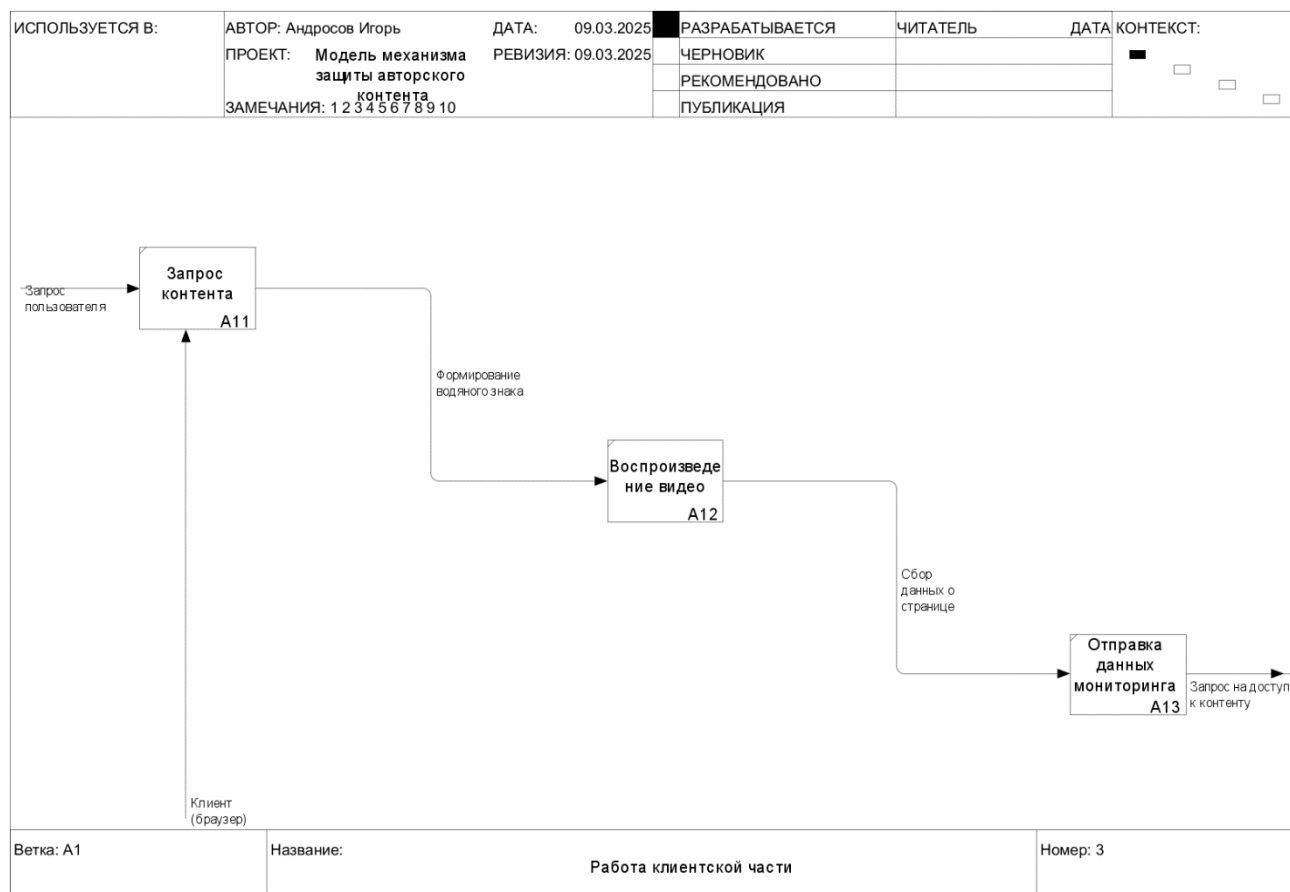


Рисунок 4. Декомпозиция диаграммы «Работа клиентской части»

Figure 4. Decomposition of the "Client side operation" diagram

Таблица 5. Описание функциональных блоков диаграммы декомпозиции «Работа клиентской части»

Table 5. Description of the functional blocks of the decomposition diagram "Work of the client part"

Название функционального блока / Name of the function block	Описание / Description
Запрос контента	Инициация доступа к защищенному материалу.
Воспроизведение видео	Отображение контента пользователю с защитными механизмами
Отправка данных мониторинга	Передача информации о целостности контента и возможных нарушениях

Таблица 6. Описание стрелок диаграммы декомпозиции «Работа клиентской части»

Table 6. Description of the arrows of the decomposition diagram "Work of the client part"

Название стрелки / Arrow name	Начало стрелки / The beginning of the arrow	Тип начала стрелки / Arrow start type	Окончание стрелки / The end of the arrow	Тип окончания стрелки / Arrow end Type
Запрос пользователя	Граница диаграммы	Управляющее воздействие	Запрос контента	Вход
Клиент (браузер)	Граница диаграммы	Механизм (ветка стрелки)	Запрос контента	Вход
Формирование водяного знака	Запрос контента	Выход	Воспроизведение видео	Вход
Сбор данных о странице	Воспроизведение видео	Выход	Отправка данных мониторинга	Вход
Запрос на доступ к контенту	Отправка данных мониторинга	Выход	Граница диаграммы	Выход

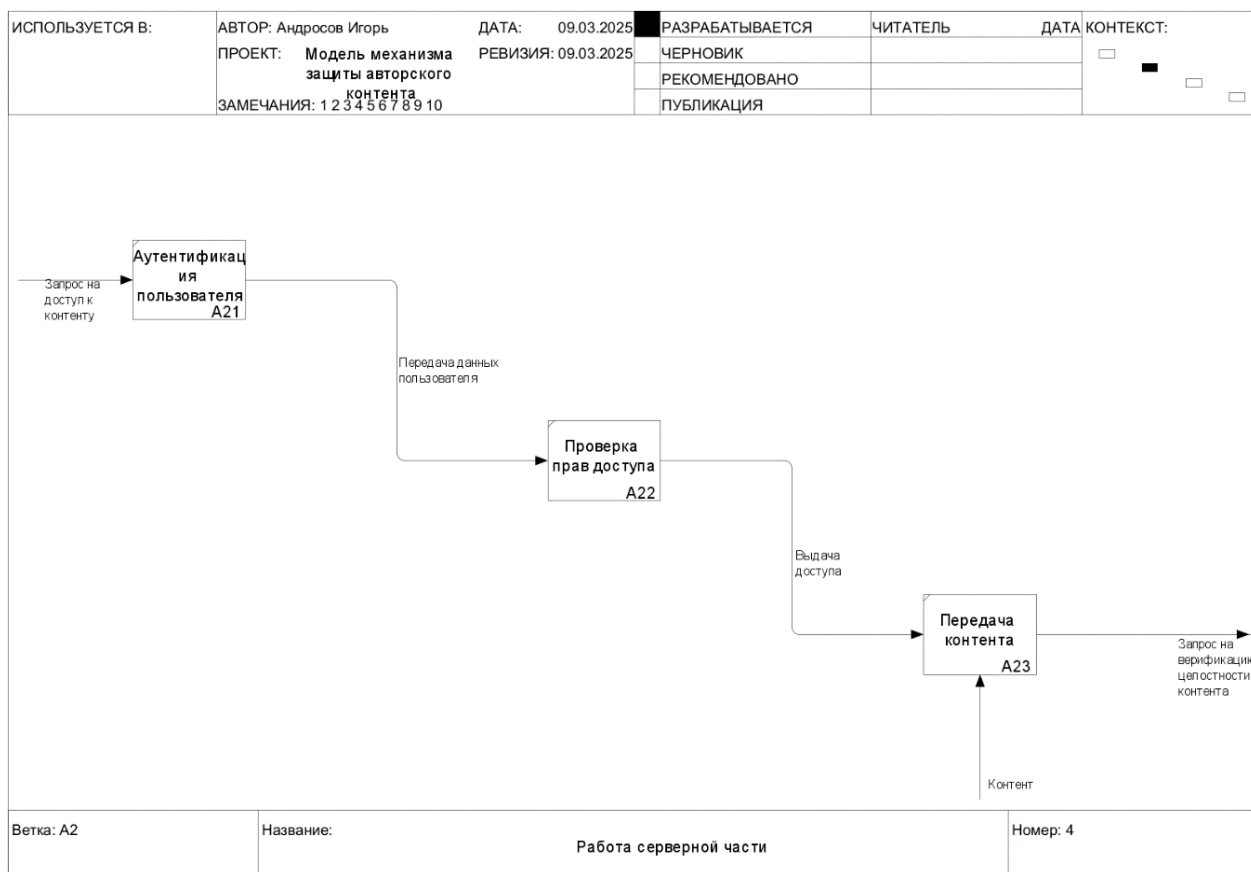


Рисунок 5. Декомпозиция диаграммы «Работа серверной части»

Figure 5. Decomposition of the "Server side operation" diagram

Таблица 7. Описание функциональных блоков диаграммы декомпозиции «Работа серверной части»

Table 7. Description of the functional blocks of the decomposition diagram "Server side operation"

Название функционального блока / Name of the function block	Описание / Description
Аутентификация пользователя	Подтверждение личности перед доступом к системе
Проверка прав доступа	Определение уровня доступа к защищенному контенту
Передача контента	Доставка разрешенного контента пользователю

Таблица 8. Описание стрелок диаграммы декомпозиции «Работа серверной части»

Table 8. Description of the arrows of the decomposition diagram "Server side operation"

Название стрелки / Arrow name	Начало стрелки / The beginning of the arrow	Тип начала стрелки / Arrow start type	Окончание стрелки / The end of the arrow	Тип окончания стрелки / Arrow end Type
Запрос на доступ к контенту	Граница диаграммы	Управляющее воздействие	Проверка прав доступа	Вход
Контент	Граница диаграммы	Механизм (ветка стрелки)	Передача контента	Вход
Передача данных пользователя	Аутентификация пользователя	Выход	Проверка прав доступа	Вход
Выдача доступа	Проверка прав доступа	Выход	Передача контента	Вход
Запрос на верификацию целостности контента	Передача контента	Выход	Граница диаграммы	Выход

Механизм обнаружения нарушений разделен на 3 этапа, которые отражены на соответствующей диаграмме (рисунок 7).
Диаграмма «Механизм обнаружения нарушений» выполнена в нотации IDEF0. Внешними объектами, взаимодействующими с процессом, являются модуль мониторинга и нормативная документация, с учётом которой строится весь процесс. Используя серверные

мощности, реализуются измерения параметров, за которыми следует фиксация инцидентов и передача в базу данных для дальнейшей работы с этими данными.
Описание функциональных блоков и стрелок диаграммы декомпозиции «Механизм обнаружения нарушений» приведено в таблицах 9 и 10 соответственно.

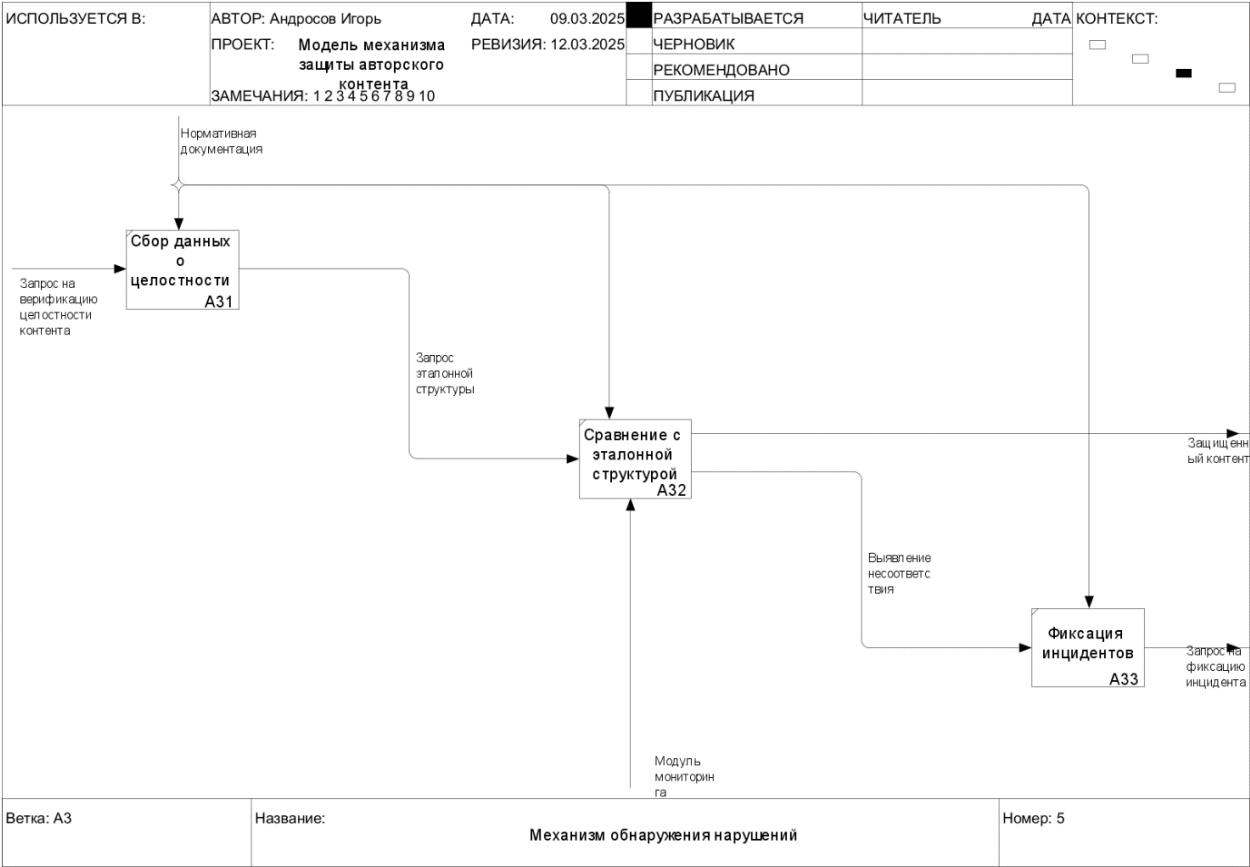


Рисунок 6. Декомпозиция диаграммы «Механизм обнаружения нарушений»
Figure 6. Decomposition of the "Violation detection mechanism" diagram

Таблица 9. Описание функциональных блоков диаграммы декомпозиции «Механизм обнаружения нарушений»
Table 9. Description of the functional blocks of the decomposition diagram "Violation detection mechanism"

Название функционального блока / Name of the function block	Описание / Description
Сбор данных о целостности страницы	Извлечение параметров структуры и содержимого
Сравнение с эталонной структурой	Анализ отличий от исходного состояния
Фиксация инцидентов	Регистрация выявленных нарушений в системе

Таблица 10. Описание стрелок диаграммы декомпозиции «Механизм обнаружения нарушений»
Table 10. Description of the arrows of the decomposition diagram "Violation detection mechanism"

Название стрелки / Arrow name	Начало стрелки / The beginning of the arrow	Тип начала стрелки / Arrow start type	Окончание стрелки / The end of the arrow	Тип окончания стрелки / Arrow end Type
Запрос на верификацию целостности контента	Граница диаграммы	Управляющее воздействие	Сбор данных о целостности страницы	Вход

Окончание таблицы 10

Название стрелки / Arrow name	Начало стрелки / The beginning of the arrow	Тип начала стрелки / Arrow start type	Окончание стрелки / The end of the arrow	Тип окончания стрелки / Arrow end Type
Нормативная до- кументация	Граница диаграммы	Управляющее воз- действие (ветка стрелки)	Сбор данных о це- лостности страницы	Вход
			Сравнение с эталонной структурой	
			Фиксация инцидентов	
Модуль монито- ринга	Граница диаграммы	Механизм (ветка стрелки)	Сравнение с эталонной структурой	Вход
Запрос эталонной структуры	Сбор данных о це- лостности страницы	Выход	Сравнение с эталонной структурой	Вход
Выявление несо- ответствия	Сравнение с эта- лонной структурой	Выход	Фиксация инцидентов	Вход
Защищенный кон- тент	Сравнение с эта- лонной структурой	Выход	Граница диаграммы	Выход
Запрос на фикса- цию инцидента	Фиксация инциден- тов	Выход	Граница диаграммы	Выход

Диаграмма декомпозиции «Сохранение результатов» отражает работу базы данных (рисунок 7).

Диаграмма «Сохранение результатов» выполнена в нотации DFD. Хранилищами дан-

ных, взаимодействующими с процессом, являются информация о пользователях, журнал нарушений и история выдачи доступов.

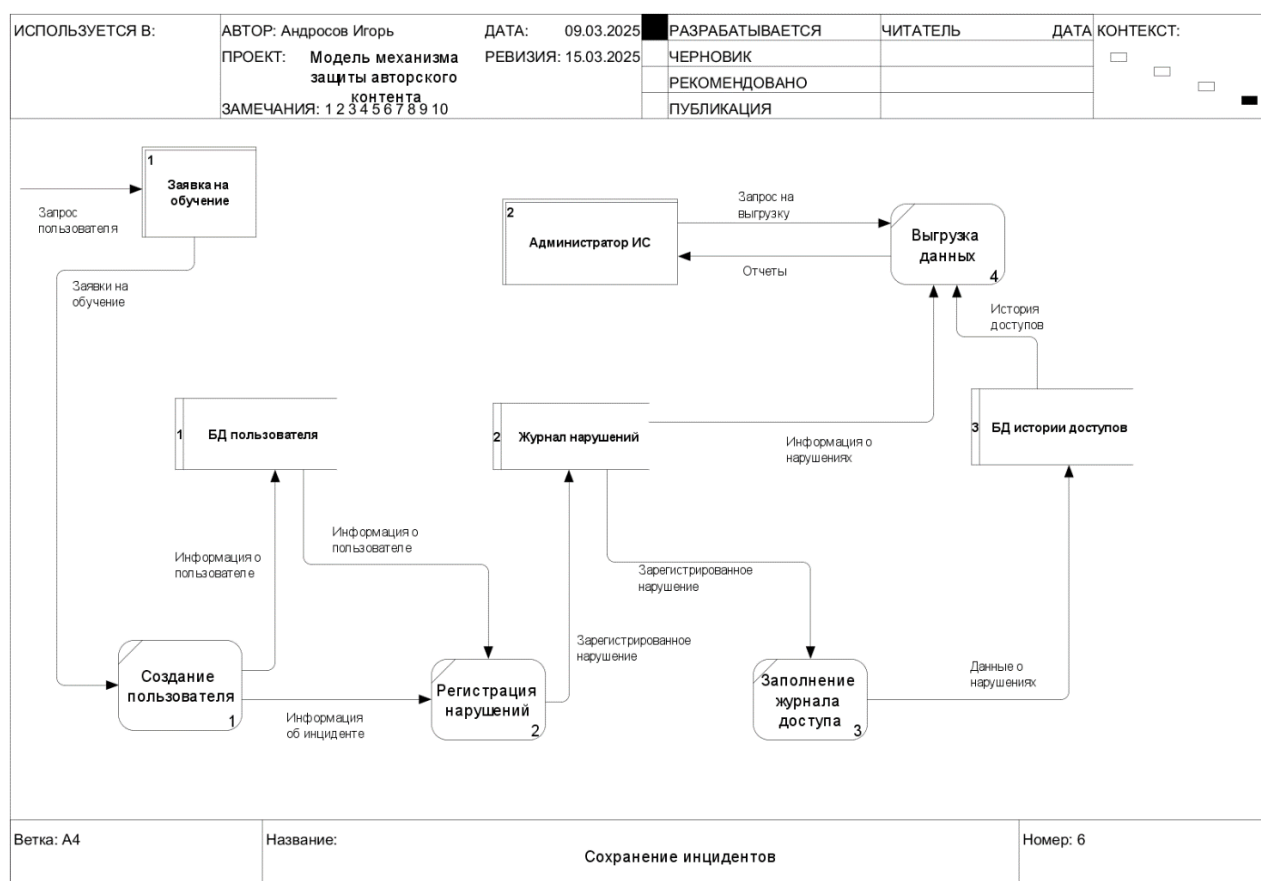


Рисунок 7. Декомпозиция диаграммы «Сохранение результатов»

Figure 7. Decomposition of the "Saving results" diagram

Описание функциональных блоков и стрелок диаграммы декомпозиции «Сохране-

ние результатов» приведено в таблицах 11 и 12 соответственно.

Рассмотрим подробнее механизм обнаружения нарушений, представленный на диаграмме (рисунок 6). Определение факта попытки обхода механизма защиты осуществляется системой на основе анализа ключевых

характеристик контента и его структуры. Будем рассматривать защищенный контент как систему, состояние которой определяется набором параметров, отражающих его целостность.

Таблица 11. Описание хранилищ диаграммы декомпозиции «Сохранение результатов»

Table 11. Description of the repositories of the decomposition diagram "Saving results"

Название функционального блока / Name of the function block	Описание / Description
БД пользователей	Данные обо всех пользователях системы
Журнал нарушений	Информация о зафиксированных инцидентах
БД истории доступов	История пользовательских запросов к системе
Заявка на обучение	Заявка на доступ к курсу от пользователя
Администратор ИС	Человек, отвечающий за ограничение доступа к системе
Создание пользователя	Запись пользователя в БД
Регистрация нарушений	Запись информации о нарушении в БД
Заполнение журнала доступа	Запись истории нарушений в БД
Выгрузка данных	Чтение информации из БД

Таблица 12. Описание стрелок диаграммы декомпозиции «Сохранение результатов»

Table 12. Description of the arrows of the decomposition diagram "Saving results"

Название стрелки / Arrow name	Начало стрелки / The beginning of the arrow	Тип начала стрелки / Arrow start type	Окончание стрелки / The end of the arrow	Тип окончания стрелки / Arrow end Type
Запрос пользователя	Граница диаграммы	Управляющее воздействие	Заявка на обучение	Вход
Заявки на обучение	Заявка на обучение	Вход	Создание пользователя	Вход
Информация о пользователе	Создание пользователя	Вход	БД пользователей	Вход
Информация о пользователе	БД пользователей	Вход	Регистрация нарушений	Вход
Информация об инциденте	Создание пользователя	Вход	Регистрация нарушений	Вход
Зарегистрированное нарушение	Создание пользователя	Вход	Журнал нарушений	Вход
Зарегистрированное нарушение	Журнал нарушений	Вход	Заполнение журнала доступа	Вход
Данные о нарушениях	Заполнение журнала доступа	Вход	БД истории доступов	Вход
Информация о нарушениях	Журнал нарушений	Вход	Выгрузка данных	Вход
История доступов	БД истории доступов	Вход	Выгрузка данных	Вход
Отчеты	Выгрузка данных	Вход	Администратор ИС	Вход
Запрос на выгрузку	Администратор ИС	Вход	Выгрузка данных	Вход

Можно выделить два состояния системы: защищенное и нарушенное. Состояние определяется значениями контрольных характеристик, которые фиксируются в процессе мониторинга. Эти характеристики включают наличие водяных знаков, корректность работы встроенных

скриптов защиты, соответствие эталонной структуре. Значения параметров хранятся в базе данных, а их значимость для общей оценки целостности контента равноценна.

Цель рассматриваемого механизма заключается в фиксировании любых отклонений

от эталонной структуры, а каждое несоответствие можно трактовать как потенциальное нарушение. Исходя из этого, алгоритм выявления нарушений будет работать по бинарному принципу:

- если все контрольные параметры соответствуют эталону - контент считается защищенным;

- если хотя бы один параметр не соответствует эталону - фиксируется инцидент.

К таким параметрам относятся: целостность структуры, наличие и корректность водяного знака, среда воспроизведения. Рассмотрим контрольные параметры подробно.

Целостность структуры страницы подразумевает соответствие оригинальной версии, сохраненной в базе данных. Любые изменения в DOM-дереве, модификация встроенных скриптов или попытки скрыть элементы могут указывать на вмешательство. Мониторинг структуры проводится с использованием контрольных хэшей и регулярных проверок клиентской среды [7, 8].

Наличие и корректность водяного знака определяются рядом критериев. Водяной знак должен быть видимым, неизменным и находиться в predetermined позициях, которые могут динамически изменяться во времени. Любая попытка его удаления, замены или ослабления прозрачности рассматривается как потенциальное нарушение.

Среда воспроизведения также подлежит строгому контролю. Контент должен загружаться только на разрешенных страницах с корректных доменов. Проверка окружения клиента позволяет выявлять подозрительные активности, такие как попытки эмуляции браузера,

подмены заголовков запросов или выполнения несанкционированных действий с воспроизводимым видео.

Таким образом, механизм мониторинга анализирует три ключевых аспекта – структуру, водяной знак и окружение – фиксируя любые отклонения от эталонной модели. Этот подход позволяет надежно выявлять попытки обхода защиты и своевременно реагировать на возможные угрозы.

Результаты исследования и их обсуждени)

Результатом данной работы является модель разрабатываемой информационной системы защиты авторского контента от незаконного копирования. Модель включает несколько уровней декомпозиции и использует для представления процессов в системе нотации IDEF0, DFD. Диаграммы IDEF0 позволяют наглядно отразить механизм мониторинга целостности контента, алгоритмы обнаружения нарушений и процесс фиксации инцидентов. Диаграммы DFD иллюстрируют движение потоков данных в системе, а также хранение информации о зафиксированных нарушениях.

Разработанная модель формирует основу для дальнейшей реализации информационной системы, включая разработку клиентских и серверных компонентов, механизмов мониторинга и алгоритмов принятия решений о нарушениях.

Выводы

В работе была разработана модель механизма защиты авторского контента, которая может быть использована для разработки комплексной системы защиты цифрового контента.

Литература

1. Зараменских, Е. П. Управление жизненным циклом информационных систем : учебник и практикум для вузов / Е. П. Зараменских. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 497 с. — URL: <https://urait.ru/bcode/511960>.
2. Полуэктова, Н. Р. Разработка веб-приложений : учебник для вузов / Н. Р. Полуэктова. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 204 с. — URL: <https://urait.ru/bcode/567610>.
3. Грекул, В. И. Проектирование информационных систем : учебник и практикум для вузов / В. И. Грекул, Н. Л. Коровкина, Г. А. Левочкина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 423 с. — URL: <https://urait.ru/bcode/533823>.
4. Зыков, С. В. Архитектура информационных систем. Основы проектирования : учебник для вузов / С. В. Зыков. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 260 с. URL: <https://urait.ru/bcode/575500>.
5. Лось, А. Б. Криптографические методы защиты информации для изучающих компьютерную безопасность : учебник для вузов / А. Б. Лось, А. Ю. Нестеренко, М. И. Рожков. — 2-е изд., испр. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 424 с. - URL: <https://urait.ru/bcode/560426>.
6. Васильева, И. Н. Криптографические методы защиты информации : учебник и практикум для вузов / И. Н. Васильева. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 310 с. — URL: <https://urait.ru/bcode/560977>.

7. Зенков, А. В. Информационная безопасность и защита информации : учебник для вузов / А. В. Зенков. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 107 с. URL: <https://urait.ru/bcode/567915>.

8. Щербак, А. В. Информационная безопасность : учебник для вузов / А. В. Щербак. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 252 с. — URL: <https://urait.ru/bcode/569267>.

References

1. Zaramenskikh, E. P. Information systems lifecycle management : textbook and practice for universities / E. P. Zaramenskikh. — 2nd ed. — Moscow : Yurayt Publishing House, 2023. — 497 p. — URL: <https://urait.ru/bcode/511960>.

2. Poluektova, N. R. Web application development : a textbook for universities / N. R. Poluektova. — 2nd ed. — Moscow : Yurait Publishing House, 2025. — 204 p. — URL: <https://urait.ru/bcode/567610>

3. Grekul, V. I. Designing information systems : a textbook and a workshop for universities / V. I. Grekul, N. L. Korovkina, G. A. Lyovochkina. — 2nd ed., revised and add. — Moscow : Yurait Publishing House, 2023. — 423 p. — URL: <https://urait.ru/bcode/533823>.

4. Zykov, S. V. Architecture of information systems. Fundamentals of design : a textbook for universities / S. V. Zykov. Moscow : Yurait Publishing House, 2025. 260 p. URL: <https://urait.ru/bcode/575500>.

5. Los, A. B. Cryptographic methods of information protection for students of computer security : a textbook for universities / A. B. Los, A. Y. Nesterenko, M. I. Rozhkov. — 2nd and

6. Vasilyeva, I. N. Cryptographic methods of information protection : textbook and workshop for universities / I. N. Vasilyeva. — Moscow : Yurait Publishing House, 2025. — 310 p. — URL: <https://urait.ru/bcode/560977>.

7. Zenkov, A.V. Information security and information protection : a textbook for universities / A.V. Zenkov. — 2nd ed., reprint. and add. Moscow : Yurait Publishing House, 2025. 107 p. URL: <https://urait.ru/bcode/567915>

8. Shcherbak, A.V. Information security : a textbook for universities / A.V. Shcherbak. — 2nd ed. — Moscow : Yurait Publishing House, 2025. — 252 p. — URL: <https://urait.ru/bcode/569267>.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Хромых Елена Алексеевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, helen_hrom@mail.ru SPIN-код 5374-8205 ORCID 0000-0003-1270-1851
Андросов Игорь Юрьевич	магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», магистрант кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, igorandrosov2002@gmail.com

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Khromykh Elena Alekseevna	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the department of Information technology, modeling and management, helen_hrom@mail.ru SPIN-code 5374-8205 ORCID 0000-0003-1270-1851
Androsov Igor Yurievich	Master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Master's student of the department of Information technology, modeling and management, igorandrosov2002@gmail.com

статья поступила в редакцию 03.03.2025	одобрена после рецензирования 18.03.2025	принята к публикации 26.03.2025
the article was submitted 03.03.2025	approved after reviewing 18.03.2025	accepted for publication 26.03.2025

Научная статья

УДК 547.979.8

ПРИМЕНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СМЕСЕВЫХ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ФАРМПРЕПАРАТОВ

Елена Владимировна Комарова✉	1	Kev.vgta@yandex.ru
Владимир Михайлович Болотов	1	za.bolotova@mail.ru
Иван Алексеевич Комаров	1	ivan20.03.02@mail.ru
Павел Николаевич Саввин	1	pashkasavvin@yandex.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Разработан способ получения лечебных мазей с использованием природных и модифицированных природных биологически активных органических соединений, обладающих антиоксидантными, ранозаживляющими и капилляроукрепляющими свойствами с использованием в качестве жировой основы масла ши, обогащенного неомыляемыми веществами.

Ключевые слова: модифицированные флавоноидные и каротиноидные соединения, масло ши, медицинские мази.

Для цитирования: Комарова Е. В., Болотов В. М., Комаров И. А., Саввин П. Н. Применение отечественных смесевых биологически активных соединений для получения новых фармпрепаратов // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 121-125.

Original article

THE USE OF DOMESTIC MIXED BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS FOR THE PRODUCTION OF NEW PHARMACEUTICAL PRODUCTS

Elena V. Komarova✉	1	Kev.vgta@yandex.ru
Vladimir M. Bolotov	1	za.bolotova@mail.ru
Ivan A. Komarov	1	ivan20.03.02@mail.ru
Pavel N. Savvin	1	pashkasavvin@yandex.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. A method for producing therapeutic ointments using natural and modified natural biologically active organic compounds having antioxidant, wound-healing and capillary-strengthening properties using shea butter enriched with non-saponifiable substances as a fat base is developed.

Keywords: modified flavonoid and carotenoid compounds, shea butter, medical ointments.

For citation: Komarova E. V., Bolotov V. M., Komarov I. A., Savvin P. N. The use of domestic mixed biologically active compounds for the production of new pharmaceutical products. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (1 (9)): 121-125. (In Russ.).

Введение

В настоящее время современная медицина уделяет повышенное внимание производству лекарственных препаратов (в том числе лечебных мазей), получаемых с использованием природных продуктов. Особое внимание уделяется производству фармацевтических изделий на основе отечественного растительного сырья, содержащего биологически активные вещества (БАВ).

При изготовлении медицинских мазей в качестве жировой основы применяют различные масла, воск, животные жиры, стеарин, ла-

нолин [1]. Данная лекарственная форма характеризуется наибольшей глубиной проникновения действующего вещества и предназначена для нанесения на кожу, раны [2, 3].

Цель выполняемой работы – разработка способа получения лечебных мазей с использованием природных и модифицированных природных биологически активных органических соединений, обладающих антиоксидантными, ранозаживляющими и капилляроукрепляющими свойствами с использованием в качестве жировой основы масла ши, обогащенного неомыляемыми веществами.

Материал и методы исследования

В качестве БАВ использовались природные и модифицированные антоциановые, флавоноидные и каротиноидные соединения.

Природные флавонолы в виде водорастворимых гликозидов выделяли из шелухи лука репчатого *Allium* сера методом водного экстрагирования в трехгорлой колбе с подогревом экстракционной смеси на кипящей водяной бане. Экстрагирование проводили до момента достижения максимального постоянного значения содержания сухих веществ в составе экстракта.

В качестве сырья для получения природных водорастворимых антоцианов (гликозидов) использовали лепестки красных роз (Black magic).

Процесс экстрагирования антоцианов проводили аналогично извлечению флавонолов, но с использованием в качестве экстрагента 2н водного раствора соляной кислоты.

Модификацию химической структуры природных флавоноидных соединений (флавонол- и антоциан-гликозидов) осуществляли гидролизом гликозидной связи в присутствии ортофосфорной кислоты при нагревании.

В результате гидролиза отщепляется высокогидрофильный углеводный остаток с образованием гидрофобного флавоноид-агликона, нерастворимого в воде и выпадающего в осадок [4].

Выделившиеся в ходе реакции осадки флавоноид-агликонов отфильтровывали и высушивали при комнатной температуре.

В качестве растительного сырья для получения каротиноидных соединений использовали широко распространенные в России корнеплоды моркови посевной (*Daucus Sativus* Roehl), листья крапивы двудомной (*Urtica dioica* L.) и лепестки цветов календулы лекарственной (*Calendula officinalis* L.).

Спирто-водорастворимые каротиноидные соединения из корнеплодов моркови посевной получали термолитической гидрофилизацией углеводородсодержащего полиенового растительного сырья путем его градиентно-ступенчатой термообработки с последующим экстрагированием пигментов полярным растворителем типа этанола или глицерина [5].

Каротиноиды из листьев крапивы двудомной и лепестков цветов календулы лекарственной выделяли экстрагированием глицерином.

В качестве эмульгаторов в рецептуре вырабатываемых мазей использовали соевый лецитин (представляющий собой смесь фосфолипидов (65-75%) с триглицеридами, произво-

димый в промышленности из масла сои после очистки).

При проведении исследований окраски экстрактов флавонолов, антоцианов и каротиноидов, а также получаемых мазей использовали RGB – цветометрию.

При оценке окраски считали, что цвет является триплетом из значений цветовых компонентов. Значение каждого цветового компонента в RGB – модели измеряется от 0 до 255 у. е.

Для экспериментального анализа цветовых характеристик растворов использовали планшетный сканер HP ScanJet 3570 C с применением компьютерной обработки изображений в цветовом режиме RGB.

При анализе цвета использовали данные, полученные обработкой цифровых изображений некоммерческой программой ImageJ 1.46.

Цветность мазей изучалась сканированием изображения приготовленного продукта с его размещением между двух стеклянных пластин.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучив свойства природных и модифицированных флавоноидов и масла ши, обогащенного неомыляемыми веществами, было принято решение растворять полифенолы в глицерине, а затем на разогретой водяной бане смешивать жировую основу и растворенные флавоноиды. Идеальным соотношением глицерина к жировой основе составило 1:2.

Флавоноиды добавляли в процентном соотношении от общей массы смеси 1:100.

Для гомогенизации мази добавляли эмульгатор соевый лецитин в соотношении с жировой основой 1:4.

Представленные варианты состава мази после нанесения на кожу человека не оставляли следов, хорошо смывались (таблица 1).

Для получения каротиноидсодержащих мазей готовили глицериновые экстракты каротиноидов, добавляли к маслу ши с последующим внесением в смесь соевого лецитина в качестве эмульгатора.

Композиционная смесь перемешивалась механической мешалкой до однородного состояния.

Приготовленные мази имели желто-оранжевые цвета, обладали однородностью, хорошо наносились на кожу человека и не вызывали ее окраски (таблица 2).

В таблице 2 представлены компоненты и органолептические характеристики исследованных образцов.

Таблица 1. Характеристики лечебных мазей на основе обогащенными неомыляемыми веществами масла ши с использованием природных и модифицированных флавоноидов

Table 1. Characteristics of medicinal ointments based on shea butter enriched with unsaponifiable substances using natural and modified flavonoids

Название мази / The name of the ointment	Компоненты / Components	Органолептические характеристики / Organoleptic characteristics
Флавонолагликоновая мазь	Глицериновый раствор флавонолагликона, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами	Мазь гелеобразной консистенции с равномерно распределенными в ней компонентами темно-желтого цвета
Флавоногликозидная мазь	Глицериновый раствор флавоногликозида, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами	Мазь гелеобразной консистенции с равномерно распределенными в ней компонентами желто-коричневого цвета
Антоциановая мазь	Глицериновый раствор антоцианлагликона, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами	Мазь гелеобразной консистенции с равномерно распределенными в ней компонентами темно-вишневого цвета

Таблица 2. Характеристики мазей с каротиноидными соединениями

Table 2. Characteristics of ointments with carotenoid compounds

Название мази / The name of the ointment	Компоненты / Components	Органолептические характеристики / Organoleptic characteristics
Каротиноидная мазь из моркови	глицериновый экстракт гидрофилизованных каротиноидных пигментов корнеплодов моркови, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами	мазь плотной консистенции суспензионного типа, состоящая из основы и равномерно распределенных в ней действующих веществ, светло-оранжевого цвета
Каротиноидная мазь из крапивы	глицериновый экстракт каротиноидных пигментов крапивы двудомной, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами	мазь плотной консистенции суспензионного типа, состоящая из основы и равномерно распределенных в ней действующих веществ, желтого цвета
Каротиноидная мазь из календулы	глицериновый экстракт каротиноидных пигментов календулы лекарственной, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами	мазь плотной консистенции суспензионного типа, состоящая из основы и равномерно распределенных в ней действующих веществ, светло-желтого цвета

Приготовленные по разработанной рецептуре лечебные мази исследовали при хранении в условиях комнатной температуры в темноте в течение трех месяцев (обычные сроки хранения мазей).

Степень сохранности биологически активных соединений в полученных образцах мазей контролировали с помощью спектрофотометрического метода анализа и метода компьютерной цветометрии [6, 7, 8].

Анализ всех образцов показал, что в течение всего времени хранения состав компонентов оставался практически без изменений.

Выводы

Установлено, что образцы полученных фармацевтических препаратов с исследуемыми БАС соответствуют всем нормам качественных показателей ГОСТ 29188.0-91 (определение внешнего вида, цвета и однородности) и ГОСТ 29188.2-91 (определения водородного показателя pH).

Литература

1. Краснюк, И. И. Фармацевтическая технология. Технология лекарственных форм [Текст]: учебник для вузов / И. И. Краснюк, С. А. Валевко, Г. В. Михайлова. – Москва: Академия, 2006. – 592 с.
2. Бойченко, Н.Б. Мягкие лекарственные формы. Технология приготовления и особенности прописи рецептов: метод. указания [Электронный ресурс] / Н.Б. Бойченко, В.А. Колесников; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 324 с.
3. Кондратьева Т.С. Технология лекарственных форм в 2-х т. / Т.С. Кондратьева. - М.: Медицина, 2014. - Т.1. - 496с.
4. Болотов, В.М. Способ получения гидрофобных флавоноловых и антоциановых соединений из флавоноидсодержащего растительного сырья [Текст]: Патент РФ на изобретение № 2733411 С1, 01.10.2020. Болотов В.М., Комарова Е.В., Саввин П.Н.
5. Патент 2139306 РФ. С 09 В 61/00. Способ получения модифицированного каротиноидного красителя из растительного сырья / В.М.Болотов, Г.О.Магомедов, О.Б.Рудаков, Е.В.Комарова (Россия). - № 98114475/13; Заявлено 20.07.98.; Опубл. 10.10.99., Бюл. № 28 // Изобретения. 1999. № 28.
6. Комарова Е.В., Болотов В.М., Саввин П.Н. Применение смесевых БАС для расширения ассортимента фармпрепаратов. Технология органических веществ: материалы 88-ой науч.-технич. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января - 16 февраля 2024 г.[Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов.-Минск: БГТУ, 2024. – 442 с, с.333-334.
7. Комарова Е.В., Болотов В.М. Применение гидрофилизированных каротиноидных БАС для получения новых фармпрепаратов. Материалы LXII отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2023 год [Текст]: В 3 ч. Ч. 1. / под ред. О.С. Корнеевой; Воронеж. гос. ун-т инж. технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2024. 148с. С. 122.
8. Комарова Е.В., Болотов В.М. Исследование свойств модифицированных БАС сельскохозяйственного растительного сырья. Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение. Сборник научных статей и докладов XI Международной научно-практической конференции ВГУИТ. – Воронеж: ВГУИТ, 2024. - С. 170-175.

References

1. Krasnyuk, I. I. Pharmaceutical technology. Technology of dosage forms [Text]: textbook for universities/I. I. Krasnyuk, S. A. Valevko, G. V. Mikhailova. - Moscow: Academy, 2006. - 592 s.
2. Bolotov, V.M. Method for preparing hydrophobic flavonol and anthocyanin compounds from flavonoid-containing plant raw materials [Text]: Russian patent for invention No. 2733411 S1, 01.10.2020. V.M. Bolotov, E.V. Komarova, P.N. Savvin
3. Perikova, L.I. Method for producing an alcohol-water-soluble carotenoid dye from plant material [Text]: Russian patent for invention No. 2221829 22.07.2002. L.I. Perikova, V.M. Bolotov, O.B. Rudakov.
4. Bolotov, V.M. Method of obtaining hydrophobic flavonol and anthocyanin compounds from flavonoid-containing plant raw materials [Text]: RF Patent for invention No. 2733411 C1, 01.10.2020. Bolotov V.M., Komarova E.V., Savvin P.N.
5. Patent 2139306 of the Russian Federation. From 09 To 61/00. A method for obtaining a modified carotenoid dye from vegetable raw materials / V.M.Bolotov, G.O.Magomedov, O.B.Rudakov, E.V.Komarova (Russia). - No. 98114475/13; Announced 07/20/98.; Publ. 10.10.99., Bul. No. 28 // Inventions. 1999. № 28.
6. Komarova E.V., Bolotov V.M., Savvin P.N. The use of blended BASS to expand the range of pharmaceutical products. Technology of organic substances: materials of the 88th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation), Minsk, January 29 - February 16, 2024 [Electronic resource] / ed. by I. V. Voitov.-Minsk: BSTU, 2024. - 442 p., pp.333-334.
7. Komarova E.V., Bolotov V.M. The use of hydrophilized carotenoid BAS for the production of new pharmaceutical preparations. Materials of the LXII reporting Scientific Conference of VGUIT teachers and researchers for 2023 [Text]: At 3 p.m. 1. / edited by O.S. Korneeva; Voronezh State University of Engineering Technology. Voronezh: VGUIT, 2024. 148с. p. 122.
8. Komarova E.V., Bolotov V.M. Investigation of the properties of modified UAS of agricultural plant raw materials. Food security: scientific, personnel and information support. Collection of scientific articles and reports of the XI VGUIT International Scientific and Practical Conference. Voronezh: VGUIT, 2024, pp. 170-175.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Комарова Елена Владимировна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, Kev.vgta@yandex.ru SPIN-код 2502-0325
Болотов Владимир Михайлович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, za.bolotova@mail.ru SPIN-код 9943-8965
Комаров Иван Алексеевич	студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, ivan20.03.02@mail.ru
Саввин Павел Николаевич	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, pashkasavvin@yandex.ru SPIN-код 6003-1023

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Komarova Elena Vladimirovna	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, Kev.vgta@yandex.ru SPIN-code 2502-0325
Bolotov Vladimir Mikhailovich	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, za.bolotova@mail.ru SPIN-code 9943-8965
Komarov Ivan Alekseevich	student, Voronezh state university of engineering technologies, student of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, ivan20.03.02@mail.ru
Savvin Pavel Nikolaevich	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, pashkasavvin@yandex.ru SPIN-code 6003-1023

статья поступила в редакцию 01.03.2025	одобрена после рецензирования 14.03.2025	принята к публикации 26.03.2025
the article was submitted 01.03.2025	approved after reviewing 14.03.2025	accepted for publication 26.03.2025

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАПОЛНЕННОГО ПОЛИСАХАРИДАМИ ПОЛИЭТИЛЕНА: ПОЛУЧЕНИЕ, ПРИМЕНЕНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ

Любовь Николаевна Студеникина✉	1	Lubov-churkina@yandex.ru
Артем Викторович Протасов	1	pav-vgta86@mail.ru
Александр Александрович Мельников	1	melnikov.shura@inbox.ru
Татьяна Романовна Поваляева	1	tanuapovaluaeva_2003@mail.ru
Ангелика Алексеевна Леонова	1	angelikasavina05@gmail.com

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены аспекты получения, применения и утилизации композитов на основе вторичного полиэтилена, наполненного полисахаридами, в частности, крахмалом и целлюлозой, с использованием пластификатора на основе вторичных ресурсов масложировой промышленности. Показано, что лимитирующим фактором переработки высоконаполненных композитов является высокая вязкость системы. Применение пластификатора на основе смеси жирных кислот, выделенных из соапстока, сопровождается снижением вязкости расплава и повышением термостабильности системы, но также снижением пористости, влагоемкости и иммобилизационной способности материалов. Исследовано применение композитов в качестве носителя илового матрикса установок биологической очистки сточных вод и упаковочных материалов. По истечении срока службы отработанные композиты могут быть утилизированы методами термической переработки, вторичной переработки для незагрязненных материалов либо подвергнуты захоронению как бытовые отходы, так как оценка их экобезопасности методами фитотестирования не выявила токсического эффекта.

Ключевые слова: полиэтилен, полисахариды, крахмал, целлюлоза, композиты, пластификатор.

Для цитирования: Студеникина Л. Н., Протасов А. В., Мельников А. А., Поваляева Т. Р., Леонова А. А. Композитные материалы на основе наполненного полисахаридами полиэтилена: получение, применение, утилизация // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 126-133.

Original article

COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYSACCHARIDE-FILLED POLYETHYLENE: PRODUCTION, APPLICATION, DISPOSAL

Lyubov N. Studenikina✉	1	Lubov-churkina@yandex.ru
Artyom V. Protasov	1	pav-vgta86@mail.ru
Alexander A. Melnikov	1	melnikov.shura@inbox.ru
Tatiana R. Povalyaeva	1	tanuapovaluaeva_2003@mail.ru
Angelika A. Leonova	1	angelikasavina05@gmail.com

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article discusses aspects of the production, application and utilization of composites based on recycled polyethylene filled with polysaccharides, in particular starch and cellulose, using a plasticizer based on secondary resources of the fat and oil industry. It is shown that the limiting factor in the processing of highly filled composites is the high viscosity of the system. The use of a plasticizer based on a mixture of fatty acids isolated from soapstock is accompanied by a decrease in the viscosity of the melt and an increase in the thermal stability of the system, but also by a decrease in porosity, moisture capacity and immobilization ability of materials. The use of composites as a carrier of the sludge matrix of biological wastewater treatment plants and packaging materials is investigated. At the end of their service life, spent composites can be disposed of by thermal recycling, recycling for uncontaminated materials, or disposed of as household waste, since an assessment of their environmental safety by phytotesting methods did not reveal a toxic effect.

Keywords: polyethylene, polysaccharides, starch, cellulose, composites, plasticizer.

For citation: Studenikina L. N., Protasov A. V., Melnikov A. A., Povalyaeva T. R., Leonova A. A. Composite materials based on polysaccharide-filled polyethylene: production, application, disposal. *Ingenernye tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 126-133. (In Russ.).

Введение

Придание новых свойств традиционным термопластичным материалам путем их компаундирования с различными наполнителями, а также замена синтетических полиолефинов (полностью или частично) в изделиях неответственного назначения на возобновляемые биоресурсы, являются актуальными задачами научных изысканий [1, 2].

Одним из самых распространенных термопластов, используемых для производства упаковочной продукции и других изделий, является полиэтилен (ПЭ). Известны работы по компаундированию ПЭ с различными полисахаридами (ПС) для получения строительных материалов (древесно-полимерные композиты) или придания упаковке свойств биоразлагаемости (следует отметить, что в последние годы биоразлагаемость материалов состава «полиолефины : полисахариды» ставится под сомнение в ряде научно-технических публикаций [3, 4]).

Тем не менее, существуют области применения композитов «ПЭ : ПС», не требующие быстрой биodeградации системы, но предъявляющие к материалу наличие таких свойств, как иммобилизация биомассы на поверхности и в объеме, частичное влагопоглощение и влагоотдача, развитая внутренняя поверхность и проч., которые можно обеспечить при высоком наполнении (не менее 25 масс.%) полиэтилена весьма распространенными и недорогими полисахаридами - целлюлозой различной дисперсности, крахмалом и др. [5, 6]. Материалы, полностью или частично полученные на основе возобновляемых биоресурсов, получили название биоосновные, они могут обладать или не обладать способностью к биodeградации.

Не менее актуальной задачей является утилизация отходов и побочных продуктов различных производств в качестве вторичных сырьевых ресурсов. При создании биоосновных композитов возможно применение побочных продуктов сельского хозяйства (например, лузги, соломы, шелухи и проч.) в качестве наполнителей или основы материала, а также отходов пищевой промышленности в качестве технологических добавок, в частности, пластификаторов (например, масло- и жиросодержащих побочных продуктов) [7, 8].

Целью работы является оценка технологических и эксплуатационных свойств высоконаполненных композитов состава «ПЭ : ПС» с применением в качестве пластифицирующей добавки побочных продуктов масложировых производств, анализ возможности их применения в отраслях биоэкономики и исследование их экобезопасности для окружающей среды.

Материал и методы исследования

Объектами исследования были композиты на основе вторичного ПЭ марки ПВД 10802-030, наполненного крахмалом (КР) кукурузным (дисперсность частиц 5-20 мкм) и микроцеллюлозой (МЦ) древесной (дисперсность частиц 10-100 мкм) в количестве 30 мас.%, с использованием в качестве пластифицирующей добавки (ПД) смеси жирных кислот (ЖК), выделенной из подсолнечного соапстока, в количестве 10 мас.%. Композиции в виде стренг, гранул и листа получали экструзией при температуре 160 ÷ 180 °С в условиях опытно-промышленного производства. В качестве объекта сравнения использовали чистый ПЭ.

В таблице 1 представлена рецептурная нумерация экспериментальных образцов.

Таблица 1. Рецептурная нумерация экспериментальных образцов

Table 1. Prescription numbering of experimental samples

Номер образца / Sample number	1	2	3	4	5
Состав образца, масс.%	ПЭ : МЦ, 70 : 30	ПЭ : МЦ : ПД, 60 : 30 : 10	ПЭ : КР, 70 : 30	ПЭ : КР : ПД, 60 : 30 : 10	ПЭ 100

Реологические исследования, оценку термостабильности и кратности переработки проводили на капиллярном реометре «SmartRHEO-1000» с программным обеспечением «CeastVIEW 5.94 4D», показатель текучести расплава (ПТР) определяли по ГОСТ 11645-73 с помощью прибора ИИРТ-5, прочностные показатели определяли по ГОСТ 11262-17 с помощью разрывной машины РМ-

50 с программным обеспечением «StretchTest», водопоглощение - по ГОСТ 4650-2014, иммобилизацию биомассы активного ила оценивали весовым методом, экотоксичность - методом фитотестирования.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1 показаны исследуемые композитные материалы в виде гранул и стренг.



Рисунок 1. Экспериментальные образцы композитных материалов

Figure 1. Experimental samples of composite materials

Как видно из рисунка 1, наполнение полиэтилена полисахаридами сопровождается разбуханием экструдата и образованием пористости композитов, что связано с отсутствием сродства между ПЭ и ПС, из-за чего возникают микрорасслоения в структуре материала, а также наличием влаги в ПС, которая в теле экструдера превращается пар и на выходе из головки из-за резкого сброса давления дает эффект вспенивающего агента. Также из рисунка 1 видно, что пластификация композита сопровождается снижением степени разбухания экструдата, что связано с лучшей подвижностью макромолекул и их сегментов в присутствии пластифицирующего компонента, и как следствие – более плотной упаковке молекулярных и надмолекулярных структур [9].

В таблице 2 представлены показатели технологических свойств исследуемых материалов, позволяющие прогнозировать их поведение в условиях производства. Как видно из

таблицы 2, наполнение ПЭ полисахаридами сопровождается весьма существенным повышением вязкости системы, но ее пластификация смесью ЖК в количестве 10 мас.% позволяет снизить вязкость и ПТР на 10-20 %.

Термомеханическая деструкция полисахаридов при переработке композитов «ПЭ : ПС» сопровождается изменением органолептических свойств материала (цвета, запаха) и может начинаться уже от 180 °С, что соответствует температуре переработки чистого ПЭ. Поэтому важно оценивать термостабильность композитного расплава, которая характеризуется периодом термостойкости, рассчитанным по изменению вязкости ($\Delta\eta$) на 5÷15 % [2, 10]. Для определения периода термостабильности исследуемых композитов $\Delta\eta$ было принято равным 10 %, критическая температура была принята равной 190 °С. Образцы выдерживали при заданной температуре в цилиндре реометра определенное количество времени и затем измеряли вязкость расплава, измерения проводили с шагом 1 мин в течение 10 мин. Результаты отражены в таблице 2.

Важным технологическим показателем для термопластичных материалов является способность сохранять технологические свойства при многократной переработке (рециклинге). Для оценки кратности переработки исследуемых композитов оценивали вязкость расплава при $t = 180$ °С и осуществляли повторную переплавку измельченного экструдата, количество циклов переработки было принято равным 10. Результаты отражены в таблице 2.

Таблица 2. Технологические показатели исследуемых материалов

Table 2. Technological indicators of the studied materials

Показатель / Indicator	Образец № / Sample No.				
	1	2	3	4	5
Показатель эффективной вязкости, Па·с, ($t = 160$ °С и $\gamma = 100$ с ⁻¹)	750	621	684	616	360
Показатель текучести расплава, г/10 мин, ($t = 160$ °С)	1.5	1.9	1.6	1.8	2.2
Период термостабильности, τ , мин, по показателю $\Delta\eta = 10$ % при $t = 190$ °С	7	8	5	6	15
Процентное снижения вязкости расплава ($\Delta\eta$, %) при 5- и 10-кратной переработке, $t = 180$ °С	12/23	10/19	15/32	13/25	5/12
Кратность переработки до достижения $\Delta\eta = 10$ %, $t = 180$ °С	4	5	3	4	8

Основными эксплуатационными характеристиками исследуемых композитов являются показатели структуры, прочностные показатели в сухом и влагонасыщенном состоянии, водопоглощение и влагоотдача, иммобилизационная способность по отношению к биомассе и др.

Существует несколько десятков аналитических методов исследования пористой структуры твёрдых тел. Известно, что макропористая структура объекта хорошо выявляется в световом микроскопе, когда распределение прошедшего или отражённого света неоднородно по интенсивности или цвету, при этом

выявление и количественный анализ макропор с размерами более 100 мкм рекомендуется проводить на свежих изломах или срезах при увеличении $\times 50$ [11]. Макроструктуру исследуемых композитов (в виде тонких срезов толщиной порядка 30 мкм) оценивали с помощью цифрового микроскопа с увеличением $\times 100$ и $\times 200$, ориентировочную площадь макропор (пустот) с размером от 1 мкм подсчитывали количественно, исходя из разной светопропускающей способности пористых и непористых участков композита, рассчитывая в итоге процент площади пустот от общей площади микроскопируемого материала. Результаты представлены в таблице 3.

Для пористых композиционных материалов различают несколько видов плотности:

объёмная плотность (рассчитывается без вычета присутствующих в материале пустот (открытых и закрытых пор)), истинная плотность (рассчитывается с вычетом всех пустот, за исключением закрытых пор), кажущаяся плотность (рассчитывается с вычетом всех пустот, определённых по количеству жидкости (газа), проникающей в поры) [12]. Для оценки объёмной плотности исследуемых композитов использовали метод обмера и взвешивания, для этого из композитного листа вырезали квадраты 2×2 см, определяли с точностью до 5 мкм размеры образцов, взвешивали высушенные до постоянной массы образцы на аналитических весах и рассчитывали плотность по отношению массы образца к его объёму. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Показатели структуры исследуемых материалов

Table 3. Indicators of the structure of the studied materials

Показатель / Indicator	Образец № / Sample No.				
	1	2	3	4	5
Объёмная плотность, г/см ³	0.58	0.63	0.61	0.65	0.91
Макропористость, %	40÷45	30÷35	35÷40	25÷30	0

При использовании материалов качестве упаковочных изделий (в случае с исследуемыми композитами это могут быть подложки, лотки и пр.) наиболее важными эксплуатационными показателями будут прочность, влагостойкость, органолептические свойства. При эксплуатации материалов в качестве биогазгоузки или в некоторых отраслях растениеводства, важны такие характеристики, как иммобилизационная способность, степень водопоглощения, прочность во влагонасыщенном состоянии, долговечность, нетоксичность [13,

14].

Прочностные показатели во влагонасыщенном состоянии определяли после экспозиции материалов в воде с $t = 20$ °C в течение суток. Прирост биомассы ила оценивали в условиях лабораторного аэротенка весовым методом, помещая образцы композитов в виде дисков в суспензию водно-иловой смеси, извлекая диски через каждые сутки в течение 10 суток и высушивая их до постоянной массы. Результаты отражены в таблице 4.

Таблица 4. Эксплуатационные показатели исследуемых материалов

Table 4. Performance indicators of the studied materials

Показатель / Indicator	Образец № / Sample No.				
	1	2	3	4	5
Прочность при разрыве, МПа, в сухом состоянии	1.6	2.1	2.0	2.5	14.1
Относительное удлинение при разрыве, %, в сухом состоянии	12	15	13	20	350
Прочность при разрыве, МПа, во влагонасыщенном состоянии	1.5	1.9	1.8	2.2	14.5
Относительное удлинение при разрыве, %, во влагонасыщенном состоянии	10	18	20	18	360
Водопоглощение за 10 суток, % мас., t воды = 20 °C	38	25	33	22	0
Прирост биомассы активного ила на материале за 10 сут, % мас.	12.5	10.2	11.1	8.5	1.5

Утилизация органических отходов возможна методами вторичной переработки либо термической переработки, а если это невозможно, то путем полигонного захоронения (хотя данный способ считается наименее экологичным среди всех существующих способов обращения с отходами). Захоронению подлежат отходы, обладающие 4 и 5 классом опасности, поэтому при разработке новых материалов необходима оценка их экобезопасности.

Экобезопасность исследуемых композитов оценивали по стандартному методу фитотестирования [15]. Для этого гранулы композитов смешивали в пропорции 1: 1 с черноземом, и высаживали в полученные модельные среды семена кресс-салата в количестве 50 шт. на 500 мл модельной смеси, с периодическим увлажнением. Через 7 суток оценивали морфометрические показатели растений. По метод учета энергии прорастания семян тест-растений, выраженной в процентах к контролю определяли степень токсичности (по шкале: 100 % - нетоксична, 80 ÷ 90 % – очень слабая токсичность, 60 ÷ 80 % – слабая токсичность, 40 ÷ 60 % – средняя токсичность, 20 ÷ 40 % – высокая токсичность, 0 ÷ 20% – очень высокая токсич-

ность). Результаты представлены в таблице 5. (модельные среды в таблице пронумерованы согласно нмерации композитов в таблице 1 (т.е. модельная среда №1 – это смесь чернозема и гранул композита №1 и т.д.).

Из таблицы 5 видно, что непластифицированные композиты обладают очень слабой токсичностью, а пластифицированные побочными продуктами масложировой промышленности обладают слабой токсичностью, что связано с наличием в составе ПД насыщенных и ненасыщенных жирных кислот, которые под действием кислорода воздуха подвергаются окислению с образованием таких продуктов, как пероксиды, гидропероксиды, спирты, альдегиды, кетоны, кислоты [16].

Таблица 5. Морфометрические показатели кресс-салата на 7 сутки фитотестирования

Table 5. Morphometric parameters of watercress on the 7th day of phytotesting

Показатель / Indicator	Морфометрические параметры кресс-салата в зависимости от среды / Morphometric parameters of watercress depending on the environment				
	Контроль	№1	№2	№3	№4
Всхожесть на 5 сутки, %	96	88	76	85	72
Длина побега, см (7 сутки)	5.5	5.2	4.6	4.9	4.3
Длина корня, см (7 сутки)	1.8	1.5	1.3	1.5	1.2
Масса ростка, г (7 сутки)	0.025	0.022	0.019	0.020	0.016
Токсичность среды	-	очень слабая	слабая	очень слабая	слабая

Технологическая схема процесса получения композитов «ПЭ:ПС:ПД» представлена на рисунке 2, компоненты - ПЭ, ПС и ПД - с помощью дозаторов – питателей одновременно подаются в высокоскоростной

z-образный смеситель, откуда подготовленная масса направляется на изготовление конечных изделий (пленки / листа, пакетов, подложек и др.).

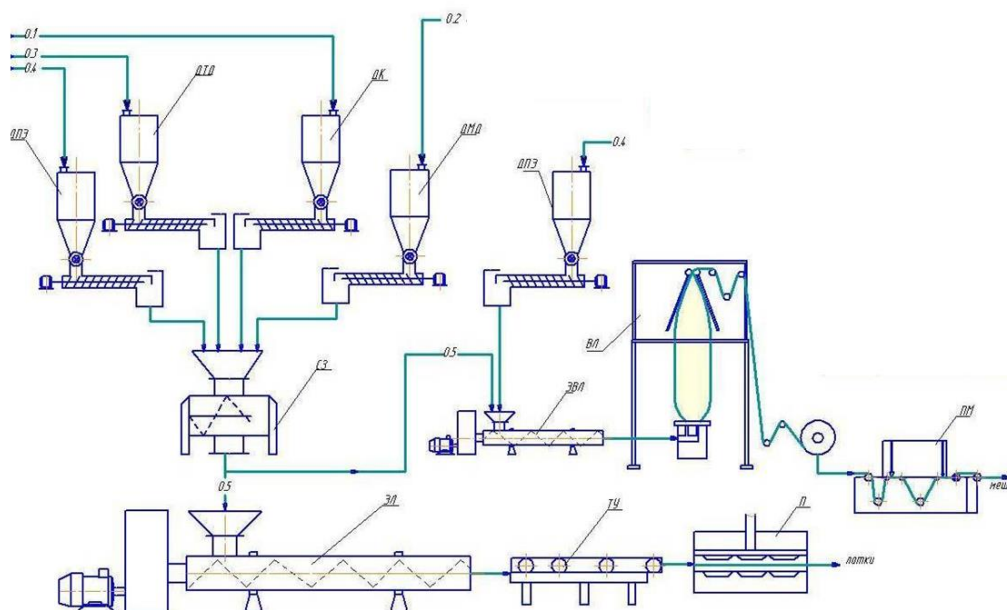


Рисунок 2. Технологическая схема производства композитов «ПЭ:ПС:МД»

Figure 2. Technological scheme for the production of "PE:PS:MD" composites

Выводы

Таким образом, установлено, что лимитирующим фактором переработки высоконаполненных композитов состава «полиэтилен : полисахарид» является высокая вязкость системы. Применение пластификатора на основе смеси жирных кислот, выделенных из соапстока, сопровождается снижением вязкости расплава и повышением термостабильности системы, но также снижением пористости, влагоемкости и иммобилизационной способ-

ности материалов. Исследовано применение композитов в качестве носителя илового матрикса установок биологической очистки сточных вод и упаковочных материалов. По истечении срока службы отработанные композиты могут быть утилизированы методами термической переработки, вторичной переработки для незагрязненных материалов либо подвергнуты захоронению как бытовые отходы, так как оценка их экобезопасности методами фитотестирования не выявила токсического эффекта.

Литература

1. Васильев И.Ю., Ананьев В.В., Колпакова В.В., Сарджвеладзе А.С. Разработка технологии получения биоразлагаемых композиций на основе полиэтилена, крахмала и моноглицеридов. Тонкие химические технологии. 2020. №15(6). С.44-55. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55>
2. Студеникина Л.Н. Получение высоконаполненного крахмалом полиэтилена с использованием модифицирующих добавок. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. технич. наук. Воронежский государственный университет инженерных технологий. Воронеж. 2012.
3. Пророкова Н.П. Проблемы биоразлагаемых полимеров. Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2013. № 1. С. 47-54.
4. Adamcová D., Vavrková M.D. Waste Biomass Valor. 2016. №7. С.1459-1467. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9542-0>
5. Мороз П.А., Аскадский Ал.А., Мацевич Т.А., Соловьева Е.В. Аскадский А.А. Применение вторичных полимеров для производства древесно-полимерных композитов. Пластические массы. 2017. №9-10. С.56-62.
6. Подденежный Е. Н., Дробышевская Н. Е., Бойко А. А., Шаповалов В. М., Дробышевский Н.С., Ашрапова Т. Ф. Биоразлагаемые композиционные материалы на основе крахмала и смеси полиолефинов. Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2021. №1 (84).
7. Корчагин В.И., Мельнова М.С., Студеникина Л.Н. Получение загрузки биофильтра для очистки сточных вод на основе вторичных ресурсов пищевых производств. Экономика. Инновации. Управление качеством. 2015. № 3 (12). С. 129.
8. Корчагин В.И., Студеникина Л.Н., Шелкунова М.В. Реологическое поведение бинарной полимерной композиции. Пластические массы. 2019. № 9-10. С. 52-55.
9. Студеникина Л.Н., Протасов А.В., Корчагин В.И., Шелкунова М.В. Технологические аспекты получения полимерной композиции для биофильтра с улучшенными иммобилизационными свойствами. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1 (63). С. 150-153.
10. Роговина С.З., Грачев А.В., Алексанян К.В., Прут Э.В. Исследование термостабильности смесей на основе синтетических полимеров и природных полисахаридов. Химия растительного сырья. 2010. №4.
11. Фандеев В.П., Самохина К.С. Методы исследования пористых структур. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Т.7. №4. <http://dx.doi.org/10.15862/34TVN415>
12. Ольхов А.А., Григорьева Е.А., Хватов А.В., Колесникова Н.Н., Попов А.А., Заиков Г.Е. О методике определения плотности вспененных полимерных композиционных материалов. NBI-technologies. 2014. №1.
13. Нгуен Туан Ань, Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю. Использование синтетических материалов на основе полиамидных волокон для интенсификации биологической очистки сточных вод. Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8, № 1. С. 168–174.
14. Студеникина Л.Н., Дочкина Ю.Н., Шелкунова М.В., Корчагин В.И. Оценка эффективности иммобилизации активного ила на композитных материалах "полиэтилен : полисахариды". Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т.80. № 4 (78). С. 356-360.
15. Студеникина Л.Н., Корчагин В.И., Шуваева Г.П., Енютина М.В., Протасов А.В. Оценка эффективности биодеструкции и эко-токсичности модифицированных полимерных композиций. Актуальная биотехнология. 2012. № 2. С. 33-37.

16. Мурашова Д.Н., Макарова Н.В. Качество растительных масел в условиях термо- и микро-волновой обработки. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 4 (310). С. 22-25.

References

1. Vasiliev I.Yu., Ananyev V.V., Kolpakova V.V., Sarjeladze A.S. Development of technology for the production of biodegradable compositions based on polyethylene, starch and monoglycerides. *Fine chemical technologies*. 2020. No. 15(6). pp. 44-55. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-6-44-55>
2. Studenikina L.N. Production of highly starch-filled polyethylene using modifying additives. Diss. for the academic degree. Candidate of Technical Sciences. Voronezh State University of Engineering Technologies. Voronezh. 2012.
3. Prophokova N.P. Problems of biodegradable polymers. *Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials (SMARTEX)*. 2013. No. 1. pp. 47-54.
4. Adamcová D., Vavrková M.D. Waste Biomass Valor. 2016. №7. C.1459-1467. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9542-0>
5. Moroz P.A., Askadsky A.I., Matseevich T.A., Solovyova E.V. Askadsky A.A. Application of secondary polymers for the production of wood-polymer composites. *Plastic masses*. 2017. No. 9-10. pp.56-62.
6. Poddenezhny E. N., Drobyshevskaya N. E., Boyko A. A., Shapovalov V. M., Drobyshevsky N.S., Ashrapova T. F. Biodegradable composite materials based on starch and a mixture of polyolefins. *Bulletin of the Sukhoi State Technical University*. 2021. №1 (84).
7. Korchagin V.I., Melnova M.S., Studenikina L.N. Obtaining biofilter loading for wastewater treatment based on secondary resources of food production. *Economy. Innovation. Quality management*. 2015. No. 3 (12). p. 129.
8. Korchagin V.I., Studenikina L.N., Shelkunova M.V. Rheological behavior of a binary polymer composition. *Plastic masses*. 2019. No. 9-10. pp. 52-55.
9. Studenikina L.N., Protasov A.V., Korchagin V.I., Shelkunova M.V. Technological aspects of obtaining a polymer composition for a biofilter with improved immobilization properties. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2015. No. 1 (63). pp. 150-153.
10. Rogovina S.Z., Grachev A.V., Aleksanyan K.V., Prut E.V. Investigation of the thermal stability of mixtures based on synthetic polymers and natural polysaccharides. *Chemistry of plant raw materials*. 2010. №4.
11. Fandeev V.P., Samokhina K.S. Methods of investigation of porous structures. Online journal "NAUKOVEDENIE". 2015. Vol. 7. No. 4. <http://dx.doi.org/10.15862/34TVN415>
12. Olkhov A.A., Grigorieva E.A., Khvatov A.V., Kolesnikova N.N., Popov A.A., Zaikov G.E. On the method of determining the density of foamed polymer composite materials. *NBI-technologies*. 2014. №1.
13. Nguyen Tuan Anh, Kulkov V.N., Soloponov E.Y. The use of synthetic materials based on polyamide fibers for the intensification of biological wastewater treatment. *Izvestiya vuzov. Investment. Construction. Realty*. 2018. Vol. 8, No. 1. pp. 168-174.
14. Studenikina L.N., Dochkina Yu.N., Shelkunova M.V., Korchagin V.I. Evaluation of the effectiveness of activated sludge immobilization on composite materials "polyethylene: polysaccharides". *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. Vol.80. No. 4 (78). pp. 356-360.
15. Studenikina L.N., Korchagin V.I., Shuvaeva G.P., Enyutina M.V., Protasov A.V. Evaluation of the effectiveness of biodegradation and eco-toxicity of modified polymer compositions. *Current biotechnology*. 2012. No. 2. pp. 33-37.
16. Murashova D.N., Makarova N.V. The quality of vegetable oils in the conditions of thermal and micro-wave treatment. *News of higher educational institutions. Food technology*. 2009. No. 4 (310). pp. 22-25.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Студеникина Любовь Николаевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, Lubov-churkina@yandex.ru SPIN-код 5506-1066 ORCID 0000-0001-6613-4974 Researcher ID AAB-4789-2020 Scopus Autor ID 57207914255
Протасов Артем Викторович	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, pav-vqta86@mail.ru SPIN-код 1411-5030 ORCID 0000-0003-0196-7734 Researcher ID E-6444-2014 Scopus Autor ID 57197870366
Мельников Александр Александрович	магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, melnikov.shura@inbox.ru
Поваляева Татьяна Романовна	студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, tanuapovaluaeva_2003@mail.ru
Леонова Ангелика Алексеевна	студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, angelikasavina05@gmail.com

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Lyubov Nikolaevna Studenikina	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Industrial ecology and technosphere safety, Lubov-churkina@yandex.ru SPIN-code 5506-1066 ORCID 0000-0001-6613-4974 Researcher ID AAB-4789-2020 Scopus Autor ID 57207914255
Artyom Viktorovich Protasov	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Industrial ecology and technosphere safety, pav-vqta86@mail.ru SPIN-code 1411-5030 ORCID 0000-0003-0196-7734 Researcher ID E-6444-2014 Scopus Autor ID 57197870366
Alexander Alexandrovich Melnikov	Master's student, Voronezh state university of engineering technologies, student of the department of Industrial ecology and technosphere safety, melnikov.shura@inbox.ru
Tatiana Romanovna Povalyaeva	Student, Voronezh state university of engineering technologies, student of the department of Industrial ecology and technosphere safety, tanuapovaluaeva_2003@mail.ru
Angelika Alekseevna Leonova	Student, Voronezh state university of engineering technologies, student of the department of Industrial ecology and technosphere safety, angelikasavina05@gmail.com

статья поступила в редакцию
03.03.2025

одобрена после рецензирования
14.03.2025

принята к публикации
27.03.2025

the article was submitted
03.03.2025

approved after reviewing
14.03.2025

accepted for publication
27.03.2025

РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ГИДРОФИЛЬНЫХ ДОБАВОК

Ольга Викторовна Карманова	¹	karolga@mail.ru
Александр Сергеевич Москалев✉	¹	bassilo@mail.ru
Анастасия Сергеевна Казакова	¹	kastpp@inbox.ru
Павел Сергеевич Москалев	¹	maskalaurum23@mail.ru
Сергей Михайлович Федоров	¹	kaftpp14@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-кт Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. На основе анализа рациональных подходов к рецептуростроению и технологических параметров изготовления водонабухающих эластомерных композиций предложены рецептурно-технологические решения по получению гидроизоляционных водонабухающих эластомерных материалов и методы оценки их свойств. Разработаны рецептуры водонабухающих эластомерных материалов на основе бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК и комбинации бентонита с полиакриламидом. Проведена сравнительная оценка водонабухающих эластомерных материалов, содержащих различные дозировки гидрофильных компонентов. Определены технологические, физико-механические и сорбционные свойства разработанных материалов. Получены гидроизоляционные материалы с необходимым комплексом упруго-прочностных свойств, обеспечивающие степень набухания в воде не менее 100 %.

Ключевые слова: гидроизоляция, каучук, водонабухающие эластомерные материалы, бентонит, полиакриламид, технологические добавки.

Для цитирования: Карманова О. В., Москалев А. С., Казакова А. С., Москалев П. С., Федоров С. М. Рецептурно-технологические решения получения гидроизоляционных эластомерных материалов на основе комбинации гидрофильных добавок // Инженерные технологии. 2025. № 1 (9). С. 134-140.

Original article

COMPOUNDING SOLUTIONS FOR OBTAINING WATERPROOFING ELASTOMERIC MATERIALS BASED ON A COMBINATION OF HYDROPHILIC ADDITIVES

Olga V. Karmanova	¹	karolga@mail.ru
Alexander S. Moskaev✉	¹	bassilo@mail.ru
Anastasia S. Kazakova	¹	kastpp@inbox.ru
Pavel S. Moskaev	¹	maskalaurum23@mail.ru
Sergey M. Fedorov	¹	kaftpp14@mail.ru

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Based on the analysis of rational approaches to formulation and technological parameters for the manufacture of water-swelling elastomeric compositions, formulation and technological solutions for the production of waterproofing water-swelling elastomeric materials and methods for evaluating their properties are proposed. Formulations of water-swelling elastomeric materials based on styrene-butadiene rubber SKS-30ARK and a combination of bentonite and polyacrylamide have been developed. A comparative assessment of water-swelling elastomeric materials containing various dosages of hydrophilic components has been carried out. The technological, physico-mechanical and sorption properties of the developed materials are determined. Waterproofing materials with the necessary complex of elastic-strength properties have been obtained, ensuring a degree of swelling in water of at least 100%.

Keywords: waterproofing, rubber, water-swelling elastomeric materials, bentonite, polyacrylamide, technological additives.

For citation: Karmanova O. V., Moskaev A. S., Kazakova A. S., Moskaev P. S., Fedorov S. M. Compounding solutions for obtaining waterproofing elastomeric materials based on a combination of hydrophilic additives. *Ingenernye tehnologii* = Engineering technologies. 2025; (1 (9)): 134-140. (In Russ.).

Введение

Гидроизоляция надземных и подземных сооружений предназначена для предотвращения проникновения дождевой или

техногенной воды внутрь конструкций помещений, а также предохранения конструкций от разрушения. В связи с этим гидроизоляционные материалы должны совмещать в себе такие свойства, как

водостойкость, долговечность, водонепроницаемость (или водопоглощение), а также удовлетворять требованиям по механической прочности, химической стойкости, деформативности, и т.д. Благодаря такому комплексу свойств, применение гидроизоляционных материалов обеспечивает повышение стойкости строительной конструкции к коррозии [1-2].

Альтернативой битумам и дегтям при производстве гидроизоляционных материалов являются полимеры. В настоящее время существует значительное количество рецептов гидроизоляционных материалов на основе полимеров, которые являются более дешевыми и эффективными, поэтому они постепенно вытесняют из производства менее надежные в эксплуатации рубероидные и толевые материалы [2].

Особенностью современных тенденций в строительстве, особенно в мегаполисах, является заглубление подземных частей конструкций, при котором качественная гидроизоляция по всему периметру сооружения является залогом долговечности и надежности возводимых конструкций. Современная гидроизоляционная система представляет собой совокупность взаимно

дополняющих друг друга элементов, предназначенных для защиты сооружений от воздействия и влаги.

Укладка бетона на металлические конструкции во время строительства сооружений приводит к образованию, так называемых, «холодных швов». Для их изоляции применяются эластомерные материалы, способные набухать в воде, проникающей в неплотности швов, заполняя свободный объем тем самым препятствуя протеканию воды. В тех случаях, когда временные протечки при устройстве стыков недопустимы, водонабухающие материалы применяются в качестве дублирующей аварийной гидроизоляции строительного объекта [3,4]. Одним из самых распространенных и хорошо зарекомендовавших себя гидроизоляционных материалов является бентонитовый шнур, представляющий собой композит из каучука и бентонита. Помимо гидроизоляции «холодных швов» при бетонировании, бентонитовые шнуры находят применение при гидроизоляции стыков железобетонных конструкций, уплотнении мест вывода коммуникаций, при герметизации технологических зазоров в тоннелях (рисунок 1) и др. [5,6].

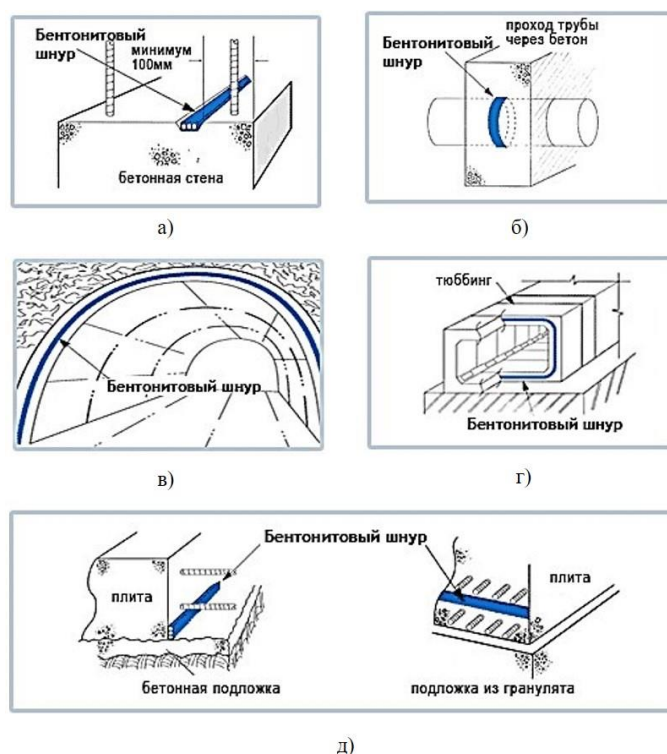


Рисунок 1. Применение бентонитового шнура в строительстве:

- а) герметизация рабочего шва стены; б) элементы герметизации коммуникаций; в) швы в тоннелях; г) готовые элементы; д) гидроизоляция «холодного шва» плит.

Figure 1. Application of bentonite cord in construction:

- a) sealing of the working seam of the wall; b) elements of sealing communications; c) seams in tunnels; d) finished elements; e) waterproofing of the "cold seam" plates.

Кроме бентонитовых шнуров используется вулканизированная водонабухающая резина на основе различных гидрофильных добавок, которая герметизирует стыки между разными элементами строительных конструкций, в том числе «холодные швы». Профили различного сечения, изготовленные из такой резины, служат надежным герметиком в швах и стыках, их используют при сборке различных бетонных и железобетонных конструкций и в монолитном строительстве.

Целью исследований являлось обоснование выбора водонабухающих добавок для получения гидроизоляционных уплотнителей на основе бутадиен-стирольного каучука.

Материалы и методы исследования

Рациональные подходы к рецептурному строению эластомерных водонабухающих композиций позволяют варьировать величину набухания в водной среде, а также динамику водопоглощения в зависимости от условий эксплуатации водонабухающих эластомеров.

Принципиальный состав водонабухающих резин обычно включает: полимерную основу, водонабухающие добавки, модификато-

ры, технологические добавки-диспергаторы, наполнители, вулканизирующую систему.

В данной работе объектами исследования являлись эластомерные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК, отличающиеся типом и дозировкой водонабухающих и технологических добавок.

В качестве компонентов обеспечивающих водопоглощение использовали: бентонит марки П1Т2 производства АО «Журавский охровский завод» (РФ, Воронежская область); добавку на основе полиакриламида (ПАА) марки Р577 (КНР). Предварительно проводили активацию бентонита с использованием хлорида натрия и карбоната натрия.

В качестве технологической добавки использовали стеариновую кислоту марки Т-32 (РФ).

Для вулканизации образцов использовали серную вулканизирующую группу.

Резиновые смеси изготавливали на лабораторных вальцах ЛБ 320 160/160 с фрикцией 1:1,14 при температуре 60 ± 5 °С в 2 стадии.

Принципиальная рецептура водонабухающих эластомерных материалов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Рецептура водонабухающих эластомерных материалов

Table 1. Formulation of water-swelling elastomeric materials

Наименование компонентов / Naming of components	Содержание масс.ч. / Content mass.h.
Каучук бутадиен-стирольный	100,00
Вулканизирующая группа	4,25
Активаторы вулканизации	5,00
Технологические добавки	10-20
Наполнители	10-20
Активированный бентонит	50-100
Полиакриламид	20-40

Вязкость по Муни (ML 1+4 при 100 °С) резиновых смесей определяли на вискозиметре согласно ГОСТ Р 54552-2011. Вулканизацию образцов осуществляли в лабораторном прессе 20-2501Э по режиму $135^{\circ}\text{C} \times 5$ мин. Физико-механические показатели вулканизатов определяли в соответствии с ГОСТ Р 54553-2019.

Для определения степени набухания эластомерных материалов в воде использовали образцы в виде шайб диаметром 50 мм и толщиной 6 мм. Образцы помещали в стакан, добавляли 500 см³ воды. Набухание оценивали по изменению массы образцов до и после выдержки в воде в течение 1-168 ч по формуле

$$\alpha = 100 \cdot (m - m_0) / m_0,$$

где m_0 , m – масса образца до и после набухания, соответственно.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Анализ научно-технической литературы и информации, представленной на сайтах компаний-производителей водонабухающих материалов [7-10] показал, что бентонит и полиакриламид обеспечивают высокую степень набухания эластомерных композиций, что обусловлено протеканием диффузионных процессов по разным механизмам и с разной скоростью в присутствии данных добавок. В этой связи представляло интерес изучение поведения

эластомеров, наполненных комбинацией данных компонентов, в ходе набухания в воде. Высокая степень наполнения эластомера предполагает введение технологических добавок, обеспечивающих с одной стороны равномерное распределение компонентов, с другой - необходимый уровень упруго-прочностных свойств уплотнителей. В качестве технологической добавки выбрали стеариновую кислоту Т-32.

При изготовлении образцов, содержащих бентонит в количестве более 50 мас.ч., отмечен сильный разогрев смеси, что может привести к преждевременной вулканизации смеси. Поэтому выбран двухстадийный метод изготовления композиций с получением маточной смеси на 1-й стадии, последующей вылежкой смеси в

течение 4-6 часов и введением вулканизирующей группы на 2-й стадии. Все резиновые смеси имели удовлетворительные оценки по качеству полученных заготовок.

Результаты определения вязкости по Муни резиновых смесей представлены в таблице 2. Образцы, содержащие 40 мас.ч. полиакриламида, имели пониженную вязкость по Муни в среднем на 5 единиц по сравнению с образцами, содержащими 20 мас.ч ПАА. Увеличение дозировки стеариновой кислоты закономерно приводит к понижению вязкости смеси вплоть до 25 усл.ед. Однако не смотря на такой низкий показатель, резиновые смеси на основе СКС-30АРК характеризовались хорошей каркасностью.

Таблица 2. Показатели вязкости по Муни резиновых смесей ВЭМ

Table 2. Muni viscosity indices of VEM rubber compounds

Образец / Содержание бентонит+ПАА / Sample / Content Bentonite+PAA	Содержание стеариновой кислоты, мас.ч. на 100 мас.ч. каучука / Stearic acid content, wt.h. per 100 wt.h. of rubber		
	5	12	20
ВЭМ50+20	32	-	-
ВЭМ50+40	28	-	-
ВЭМ 100+20	-	36	-
ВЭМ 100+40	-	30	25

Следует отметить, что вязкость по Муни всех полученных образцов эластомерных композиций сопоставима с производимыми на рынке аналогами.

Для водонабухающих эластомерных материалов необходимо обеспечить требуемый уровень упруго-прочностных показателей, т.к.

важно чтобы изделия не разрушались в ходе срока эксплуатации, и была возможность их укладки в технологические швы заданной конфигурации.

Результаты определения упруго-прочностных свойств разработанных материалов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Физико-механические показатели ВЭМ

Table 3. Physico-mechanical parameters of VEM

Показатель / Indicator	Образец/Содержание бентонит + ПАА + стеариновая кислота / Sample/Content of bentonite + PAA + stearic acid				
	ВЭМ 50+20+5	ВЭМ 50+40+5	ВЭМ 100+20+12	ВЭМ 100+40+12	ВЭМ 100+40+20
Условная прочность при растяжении, МПа	5,8	5,1	4,3	3,5	3,1
Условное напряжение при удлинении 300 %	2,4	1,8	2,0	2,0	2,3
Относительное удлинение при разрыве, %	580	670	430	490	530
Относительное остаточное удлинение, %	40	40	33	33	36

Образцы водонабухающих резин имеют достаточно высокие показатели относительного удлинения при разрыве в пределах 490-670 %. Что свидетельствует о корректно подобранном режиме вулканизации – до достижения максимальной степени сшивки. Все образцы имели показатель условной прочности при растяжении

в пределах 3,1-5,8 МПа. Согласно литературным источникам [8-10] для водонабухающих гидроизоляционных уплотнителей такой уровень показателя является достаточным; при высоких показателях прочности уплотнители имеют низкую степень набухания в воде.

Важнейшим свойством разрабатываемых материалов является их способность к набуханию в воде. Для таких материалов важно подобрать технологические режимы получения с одной стороны, обеспечивающие высокую степень набухания, с другой сохранение упру-

го-прочностных свойств на должном уровне в течение всего срока эксплуатации.

Для оценки степени набухания образцы в виде шайб помещали в воду и через определенные интервалы времени (таблица 4) определяли их массу и рассчитывали степень набухания.

Таблица 4. Степень набухания ВЭМ

Table 4. Degree of swelling of VEM

Образец/ Содержание бентонит+ПАА+ стеариновая кислота / Sample/Content of bentonite + PAA + stearic acid	Время испытания/ Степень набухания, % / Test time/ Degree of swelling, %					
	1 ч	6ч	24 ч	48 ч	72 ч	168 ч
ВЭМ 50+20+5	2	9	21	26	28	28
ВЭМ 50+40+5	2	25	52	80	82	90
ВЭМ 100+20+12	2	12	27	35	35	40
ВЭМ 100+40+12	5	36	61	95	104	111
ВЭМ 100+40+20	5	37	70	112	127	124

Анализ данных таблицы 4 показал, что дозировка бентонита и полиакриламида в значительной степени влияет на степень набухания образцов.

Образцы, содержащие 40 мас.ч. ПАА имеют в 3 раза больший показатель степени набухания по сравнению с образцами, содержащими 20 мас.ч. ПАА независимо от дозировки бентонита. Образцы, содержащие 100 мас.ч. бентонита имеют в среднем на 40% больший показатель степени набухания по сравнению с образцами, содержащими 50 мас.ч. бентонита. Таким образом, влияние бентонита на степень набухания образцов значительно ниже по сравнению с влиянием полиакриламида. Однако, учитывая низкую стоимость бентонита в сравнении с другими компонентами, повышенная дозировка бентонита позволит получать изделия с низкой себестоимостью.

Заключение

Разработаны рецептуры водонабухающих эластомерных материалов на основе бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК и комбинации водонабухающих добавок. Показано влияние дозровок бентонита, полиакриламида и стеариновой кислоты на технологические и эксплуатационные свойства гидроизоляционных материалов.

Установлено, что образцы, содержащие 100 мас.ч. бентонита и 40 мас.ч. ПАА имеют лучший комплекс свойств при повышенной дозировке стеариновой кислоты (20 мас.ч.).

Таким образом, использование комбинации бентонита и полиакриламида позволяет получать материалы со степенью набухания до 147%, что удовлетворяет эксплуатационным требованиям, предъявляемым в таком гидроизоляционным уплотнителям.

Литература

1. Сторожук И.П., Федотов А.Ф., Мишин С.И. Методические рекомендации по гидроизоляции и антикоррозионной защите дорожно- транспортных и коммуникационных сооружений в г. Москве — Москва, 2008.
2. Тухарели, В. Д. Современные тенденции развития технологий гидроизоляции зданий и сооружений / В. Д. Тухарели, А. В. Тухарели, А. А. Габля//Инженерный вестник Дона.—2017. №3(46).URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-tehnologiy-gidroizolyatsii-zdaniy-i-sooruzheniy> (дата обращения: 24.12.2024).
3. Рахимов М.М. Резиновые уплотнительные прокладки железобетонных блоков обделки тоннеля метрополитена // Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций. Научно-технический альманах. – М.: ТИМР, 2001, № 2-3. – С. 29-35.
4. Эластомерные невулканизированные гидроизоляционные материалы строительного назначения / О. В. Карманова, А. С. Москалев, Ю. Ф. Шутилин, Л. А. Власова // Вестник Воронежского го-

сударственного университета инженерных технологий. – 2016. – № 4(70). – С. 228-232. – DOI 10.20914/2310-1202-2016-4-228-232. – EDN XWESRP.

5. Шилин А.А., Зайцев М.В., Золотарев И.А., Ляпидевская О.Б. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительстве и ремонте. Учеб. пособие. – Тверь, изд-во «Русская торговая марка», 2003. – 396 с.

6. Фадеев А. Б. Гидроизоляция подземных частей зданий и сооружений: учебное пособие для студентов строительных специальностей / СПб. гос. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2007. – 53 с.

7. Компания SUHOFF производство бентонитовых шнуров [Электронный ресурс]. URL: <https://suhoff-spb.ru/products/bentonitovye-rasshiryayushhiesya-shnury/> (дата обращения: 22.01.2025)

8. Состояние и тенденции развития производства и применения водо- и нефтенабухающих эластомеров для пакерного оборудования / И. А. Новаков, М. А. Ваниев, С. С. Лопатина [и др.] // Каучук и резина. – 2019. – Т. 78, № 4. – С. 228-239. – EDN RPGUQB.

9. The Composition and Technological Aspects of Obtaining Water-Swelling Elastomeric Materials / O. V. Karmanova, A. S. Moskalev, S. G. Tikhomirov, Yu. F. Shutilin // Advanced Materials and Technologies. – 2019. – No. 1. – P. 45-48. – DOI 10.17277/amt.2019.01.pp. 045-048. – EDN ZATVRR.

10. Нгок, Х. Х. Водонабухающие резины. Способы производства и применение / Х. Х. Нгок, Д. Т. Чам, А. П. Рахматуллина // Бутлеровские сообщения. – 2021. – Т. 66, № 5. – С. 24-34. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/21-66-5-24. – EDNAKDPLR.

References

1. Storozhuk I.P., Fedotov A.F., Mishin S.I. Methodological recommendations on waterproofing and anticorrosive protection of road transport and communication structures in Moscow - Moscow, 2008.

2. Tukhareli V.D. Modern trends in the development of waterproofing technologies for buildings and structures / V. D. Tukhareli, A.V. Tukhareli, A. A. Gablia//Engineering Bulletin of the Don. – 2017.–№3(46). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-tehnologiy-gidroizolyatsii-zdaniy-i-sooruzheniy>

3. Rakhimov M.M. Rubber sealing gaskets of reinforced concrete blocks lining the subway tunnel // Problems of development of transport and engineering communications. Scientific and Technical Almanac. Moscow: TIMR, 2001, No. 2-3, pp. 29-35.

4. Elastomeric non-vulcanized waterproofing materials for construction purposes / O. V. Karmanova, A. S. Moskalev, Yu. F. Shutilin, L. A. Vlasova // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2016. – № 4(70). – Pp. 228-232. – DOI 10.20914/2310-1202-2016-4-228-232. – EDN XWESRP.

5. Shilin A.A., Zaitsev M.V., Zolotarev I.A., Lyapidevskaya O.B. Waterproofing of underground and buried structures during construction and repair. Study guide. Tver, publishing house "Russian trademark", 2003. 396 p.

6. Fadeev A. B. Waterproofing of underground parts of buildings and structures: a textbook for students of construction specialties / St. Petersburg State University of Architecture."He's building. University of St. Petersburg, 2007. 53 p.

7. SUHOFF company produces bentonite cords [Electronic resource]. URL: <https://suhoff-spb.ru/products/bentonitovye-rasshiryayushhiesya-shnury/> (date of request: 01/22/2025)

8. The state and trends in the development of production and application of water- and oil-swelling elastomers for packer equipment / I. A. Novakov, M. A. Vaniev, S. S. Lopatina [et al.] // Rubber and rubber. – 2019. – Vol. 78, No. 4. – pp. 228-239. – EDN RPGUQB.

9. The Composition and Technological Aspects of Obtaining Water-Swelling Elastomeric Materials / O. V. Karmanova, A. S. Moskalev, S. G. Tikhomirov, Yu. F. Shutilin // Advanced Materials and Technologies. – 2019. – No. 1. – P. 45-48. – DOI 10.17277/amt.2019.01.pp.045-048. – EDN ZATVRR.

10. Ngok, H. H. Water-swelling rubbers. Methods of production and application / H. H. Ngok, D. T. Cham, A. P. Rakhmatullina // Butlerov communications. – 2021. – Vol. 66, No. 5. – pp. 24-34. – DOI 10.37952/ROI-jbc-01/21-66-5-24. – EDNAKDPLR.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Карманова Ольга Викторовна	доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой Технологии органических соединений и переработки полимеров, karolga@mail.ru SPIN-код 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Москалев Александр Сергеевич	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, bassilo@mail.ru SPIN-код 6099-3687 ORCID 0000-0002-3403-3850 Researcher ID E-8116-2014 Scopus Autor ID 57200386822
Казакова Анастасия Сергеевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, kastpp@inbox.ru SPIN-code 8313-5271 ORCID 0009-0008-9247-8998 ScopusAuthor ID 57222157705 WOS Research ID HKV-4968-2023
Москалев Павел Сергеевич	магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, maskalaurum23@mail.ru
Федоров Сергей Михайлович	студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, kaftpp14@mail.ru

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Karmanova Olga Viktorovna	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, head of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, karolga@mail.ru SPIN-code 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Moskalev Alexander Sergeyevich	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, bassilo@mail.ru SPIN-code 6099-3687 ORCID 0000-0002-3403-3850 Researcher ID E-8116-2014 Scopus Autor ID 57200386822
Kazakova Anastasia Sergeevna	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, kastpp@inbox.ru SPIN-code 8313-5271 ORCID 0009-0008-9247-8998 ScopusAuthor ID 57222157705 WOS Research ID HKV-4968-2023
Moskalev Pavel Sergeyevich	master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, student of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, maskalaurum23@mail.ru
Fedorov Sergey Mikhailovich	student, Voronezh State University of Engineering Technologies, student of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, kaftpp14@mail.ru

статья поступила в редакцию
07.03.2025

одобрена после рецензирования
18.03.2025

принята к публикации
27.03.2025

the article was submitted
07.03.2025

approved after reviewing
18.03.2025

accepted for publication
27.03.2025

