

ISSN 2949-6241
e-ISSN 2949-6233

Инженерные Технологии



№ 3 (7) 2024

16+

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 3 (7), 2024

16+

ENGINEERING TECHNOLOGIES
SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

№ 3 (7), 2024

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)

Кущев 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 Юэен, 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

Скрыпников 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@vgtasu.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 30.09.2024.

Выход в свет: 07.10.2024.

Формат 70x100 1/8

Усл. печ. л. 10,75. Тираж 100 экз. Заказ №

Цена - свободная

© ФГБОУ ВО

«Воронеж. гос. ун-т инж.
технол.», 2024

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), boreyko.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 Shaukatovna, 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), moksnad@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 Technology (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@vgasu.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), jianqiyu@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 30.09.2024.

The publication: 07.10.2024.

Format 70 x 100 1/8

Usl. pech. l. 10,75. Edition of 100 copies. Order No.

Price - free

© FSBEI HE

«Voronezh State University of
Engineering and Technology»,
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и телекоммуникации

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРОДАВЦОМ НА ЭЛЕКТРОННОЙ ТОРГОВОЙ ПЛОЩАДКЕ <i>Дрюкова П. В., Матвеев М. Г.</i>	15
РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО КОНСУЛЬТАНТА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ЦЕНТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА <i>Коробова Л. А., Головин А. И.</i>	23
СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ PDF РЕДАКТОРОВ <i>Токарев Ю. Ю., Коробова Л. А.</i>	35

Химические технологии, науки о материалах

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ НАПЫЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ <i>Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Котов А. П.</i>	42
ВЛИЯНИЕ ФОСФОРНОГО ШЛАКА, ЖИДКОГО СТЕКЛА И ГРУНТА НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ <i>Викулин И. А., Скрыпников А. А., Сергеев А. С., Боровлев Ю. А., Шульгин Д. П., Самойленко А. В.</i>	51
ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ И НЕСТАБИЛЬНОСТИ СКАЛЯРНЫХ ПОЛЕЙ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ В АППАРАТАХ ХИМИЧЕСКИХ И ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ В СВЕТЕ ЛИКВИДАЦИИ ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ <i>Пугачева И. Н., Емельянов А. Б., Батурина Е. В.</i>	65
ВУЛКАНИЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ В РЕЦЕПТУРЕ РЕЗИН НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ КАУЧУКОВ <i>Карманова О. В., Шутилин Ю. Ф.</i>	71
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕЗИН НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ КАУЧУКОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ КОМПЛЕКСНОГО АКТИВАТОРА ВУЛКАНИЗАЦИИ <i>Карманова О. В., Голякевич А. А., Благина А. Б., Хромина Е. А.</i>	78

CONTENTS

Information technology and telecommunications

DECISION-SUPPORT INFORMATION TECHNOLOGIES FOR SELLERS ON ELECTRONIC TRADING PLATFORMS <i>Driukova P. V., Matveev M. G.</i>	15
DEVELOPMENT OF A VIRTUAL CONSULTANT FOR A MEDICAL CENTER USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE <i>Korobova L. A., Golovin A. I.</i>	23
COMPARISON OF VARIOUS PDF EDITORS <i>Tokarev Yu. Yu., Korobova L. A.</i>	35

Chemical technologies, materials sciences

THEORETICAL AND METALLOGRAPHIC STUDIES BY SPRAYING FUNCTIONAL COATINGS USING PLASMA <i>Zhachkin S. Yu., Trifonov G. I., Kotov A. P.</i>	42
THE INTERACTION OF PHOSPHORIC SLAG, LIQUID GLASS AND SOIL IN THE ROADBED OF LOGGING ROADS <i>Vikulin I. A., Skrypnikov A. A., Sergeev A. S., Borovlev Yu. A., Shulgin D. P., Samoylenko A. V.</i>	51
EVALUATION OF THE UNEVENNESS AND INSTABILITY OF SCALAR FIELDS OPERATING PARAMETERS IN CHEMICAL AND FOOD DEVICES PRODUCTION FACILITIES IN THE LIGHT OF THE ELIMINATION OF MAN-MADE HAZARDS <i>Pugacheva I. N., Emelyanov A. B., Baturina E. V.</i>	65
VULCANISING SYSTEMS IN RUBBERS BASED ON RUBBER BLENDS <i>Karmanova O. V., Shutilin Yu. F.</i>	71
PROPERTIES OF THE RUBBERS BASED ON NITRILE-BUTADIENE RUBBERS WITH A COMPLEX VULCANISATION ACTIVATOR <i>Karmanova O. V., Golyakevich A. A., Blagina A. B., Khromina E. A.</i>	78

Научная статья

УДК 519.217.6

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРОДАВЦОМ НА ЭЛЕКТРОННОЙ ТОРГОВОЙ ПЛОЩАДКЕ**

Полина Викторовна Дрюкова ✉¹ dpv1202@mail.ru
Михаил Григорьевич Матвеев¹ mqmatveev@yandex.ru

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

Аннотация. Исследован процесс разработки информационных технологий поддержки принятия решений для продавцов на электронных торговых площадках. Показано, что для успешного формирования предложения продавцу необходимо учитывать спрос покупателей, используя рекомендательные системы. Описан процесс создания системы рекомендаций, основанной на математическом сравнении характеристик спроса и предложения (матчинг). В ходе исследования определены параметры товаров и их соответствие покупательским предпочтениям на основе векторных характеристик. Рассматриваются алгоритмы формирования оптимального товарного предложения на основе анализа данных с маркетплейса. Выявлены основные факторы, влияющие на вероятность успешной продажи товара, и предложен метод корректировки товарных характеристик для увеличения вероятности сделки. Предложенная методика позволяет улучшить качество принимаемых решений продавцами и повысить их конкурентоспособность на рынке.

Ключевые слова: маркетплейс, покупательский спрос, товарное предложение, матчинг, оператор агрегирования, электронная торговля.

Для цитирования: Дрюкова П. В., Матвеев М. Г. Информационные технологии поддержки принятия решений продавцом на электронной торговой площадке // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 15-22.

Original article

**DECISION-SUPPORT INFORMATION TECHNOLOGIES FOR SELLERS
ON ELECTRONIC TRADING PLATFORMS**

Polina V. Driukova ✉¹ dpv1202@mail.ru
Mikhail G. Matveev¹ mqmatveev@yandex.ru

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

Abstract. The process of developing decision-support information technologies for sellers on electronic trading platforms (marketplaces) is studied. It is shown that for successful offer formation, sellers need to consider consumer demand by using recommendation systems. The creation of a recommendation system based on the mathematical comparison of demand and supply characteristics (matching) is described. The study identifies product parameters and their alignment with consumer preferences based on vector characteristics. Algorithms for forming an optimal product offer based on marketplace data analysis are considered. Key factors influencing the likelihood of a successful sale are identified, and a method for adjusting product characteristics to increase the probability of a transaction is proposed. The proposed methodology aims to improve the quality of decision-making by sellers and enhance their competitiveness in the market.

Keywords: marketplace, consumer demand, product offer, matching, aggregation operator, electronic commerce.

For citation: Driukova P. V., Matveev M. G. Decision-support information technologies for sellers on electronic trading platforms. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 15-22. (In Russ.).

Введение

С развитием современных технологий многие направления в торговле не просто изменились, а получили совершенно новые формы. В последние годы быстрыми темпами растет популярность электронных торговых площадок (маркетплейс), которых на рынке

становится все больше. Они формируют информационное пространство для эффективного взаимодействия продавцов и покупателей в рамках конкретной отрасли.

Маркетплейс призван помочь покупателю найти необходимые ему товары и услуги, выбирая лучшее по таким параметрам как: производитель, цена, качество и другие. А

также, помочь продавцам с выбором выставляемого на продажу товара и его параметров. Организовывая поддержку продавцам и покупателям, маркетплейс должен обеспечивать согласование целей продавцов и покупателей, как необходимое условие эффективных продаж. Покупатель сам формирует свои цели, заходя на сайт маркетплейса, в виде поискового запроса товара с желаемыми параметрами. Совокупность таких запросов отображает покупательский спрос.

Продавец, формируя свое предложение в базе данных маркетплейса, должен ориентироваться на покупательский спрос. Для этого продавцу необходима рекомендательная система, способная оценивать уровень соответствия покупательского спроса и предложения продавца. Информационную основу такой системы обеспечивает маркетплейс, заинтересованный в привлечении продавцов адекватных сформированному спросу. Чем больше будет таких продавцов тем больше заработает маркетплейс, финансируемый этими продавцами [1].

В данной работе предлагаются информационные технологии создания рекомендательного сервиса для продавца, с учетом спроса покупателей. Рекомендательная система поможет продавцу подобрать такие параметры товара, которые обеспечивают наибольшую выгоду. В основу рекомендательной системы положено векторное представление характеристик спроса и предложения с последующим сравнительным анализом (матчингом) этих векторов и выбором наилучшего варианта сделки.

Материал и методы исследования

Информационные технологии – это совокупность средств и методов сбора, обработки и передачи данных (первичной информации) для получения информации нового качества о состоянии объекта, процесса или явления (информационного продукта).

Информация, необходимая для рекомендательного сервиса формируется за счет парсинга из базы данных маркетплейса, доступ к которой обеспечивается с помощью API.

Для того чтобы формировать информационные технологии, необходимо иметь единую форму всех информационных процессов, которые происходят на маркетплейсе, например, процесса обработки информации о товарах. Чтобы охарактеризовать любой товар, нужен некоторый набор параметров, который задается товарными

классификаторами маркетплейса [2]. Товарный классификатор – это структура ассортимента, которая распределена на схожие по определенным критериям группы товаров. Товарные классификаторы формируются на основании иерархического, фасетного и/или смешанного методов.

В работе предлагается построить алгоритм сервиса на основе соответствия характеристик товара, выставляемого продавцом, покупательскому спросу. Для такого соответствия удобно использовать товарные классификаторы фасетного типа. Далее будем использовать вектор характеристик товара вместо аналогичного ему фасетного классификатора.

Вектор товарных характеристик имеет следующий вид:

$$q = (q^1(x); q^2(x); \dots; q^n(x)), \quad (1)$$

где q^n – имя n -го параметра, характеризующего товар из однородной группы; x – значение этого параметра.

Далее под однородными товарами будем понимать товары, имеющие одинаковое функциональное назначение, одинаковую структуру параметров, но различающиеся значениями этих параметров. Однородные товары всегда имеют одно и то же имя. Такие классификаторы составляют основу нормативно-справочной информации маркетплейса.

Выделим среди товарных характеристик характеристики спроса, которые часто задаются не конкретными значениями, а некоторым диапазоном значений, например, желаемая цена. Мы предлагаем учитывать пожелания покупателей в этом диапазоне, например, меньшая цена предпочтительней большей. Следуя [3], будем отображать пожелания в виде нечетких параметров спроса:

$$\tilde{g}_{ij} = (\tilde{g}_{ij}^1; \tilde{g}_{ij}^2 \dots \tilde{g}_{ij}^N), \quad (2)$$

где \tilde{g}_{ij}^n – лингвистическая переменная, отображающая n -й параметр i -го товара j -го покупателя. Каждая лингвистическая переменная имеет кусочно-линейную функцию принадлежности, $f_g(x) \in [0, 1]$, носители которых $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ отражают допустимые значения параметра, а значения функции – предпочтения покупателей. Для дискретных значений носителя функции предпочтений будут иметь дискретный вид.

Пусть каждый продавец формализует свои возможности и желания в отношении

однородного товаров виде векторов с именами лингвистических характеристик, таких же как и у покупателя:

$$\tilde{q}_{ij} = (\tilde{q}_{ij}^1; \tilde{q}_{ij}^2 \dots \tilde{q}_{ij}^N), \tag{3}$$

где \tilde{q}_{ij}^n - лингвистическая переменная, отображающая n -й параметр i -го товара j -го продавца.

Желания и возможности продавца также отображаются функциями принадлежности $f_q(x) \in [0,1]$. Функции принадлежности $f_g(x)$ и $f_q(x)$ имеют следующий вид:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c; \\ 0, & x > d, x < a. \end{cases} \tag{4}$$

Вычислять соответствие товара индивидуальному спросу покупателей практически невозможная задача. Поэтому предлагается ориентироваться на обобщенный спрос. Правомерность такого похода показана в работе [3].

Обобщенный спрос имеет ту же структура, что и индивидуальный, только каждая компонента вектора спроса представляет собой свертку индивидуальных компонент

$$\tilde{g} = (\tilde{g}^1; \tilde{g}^2 \dots \tilde{g}^N), \tilde{g}^n = \bigcup_{j=1}^N \tilde{g}_j^n. \tag{5}$$

Функция принадлежности обобщенного спроса по компоненте n -вектора спроса будет иметь вид:

$$f_g^n(x) = \sum_{j=1}^N f_j^n(x) w_j^n, \tag{6}$$

где w_j^n -весовые коэффициенты.

Для оценки соответствия векторов (3) и (5) необходимо ввести числовую меру такого соответствия.

Оценку степени соответствия удобно проводить в два этапа. Сначала найти парные локальные соответствия компонент векторов (3) и (5), а затем агрегировать полученные локальные соответствия в единую числовую меру соответствия потребностей продавца и покупателя по рассматриваемому типу товара.

Введем следующую операцию [4], которая позволяет получить достаточно информативную локальную меру соответствия компонент \tilde{q}_{ij}^n и \tilde{g}_j^n . Эта локальная характеристика вычисляется как пересечение соответствующих нечетких множеств и служит локальной мерой соответствия однородных пар компонент:

$$f^n(x) = \min\{f_q^n(x); f_g^n(x)\}. \tag{7}$$

В частном случае, когда, например, продавец выставляет однозначное (четкое) значение X компоненты, выражение (7) преобразуется к виду (8):

$$f^n(x) = \min\{1; f_g^n(x)\}. \tag{8}$$

Полученные локальные меры соответствия компонент векторов (3) и (5) образуют векторы соответствия условий обобщенного спроса и предложения:

$$f_{ij} = (f_{ij}^1; \dots; f_{ij}^n; \dots; f_{ij}^N). \tag{9}$$

Иллюстрация пересечения обобщенного спроса и предложения показана на рисунке 1, где результат пересечения выделен жирной линией. Следует обратить внимание на то, что определение максимального локального соответствия не представляет проблем.

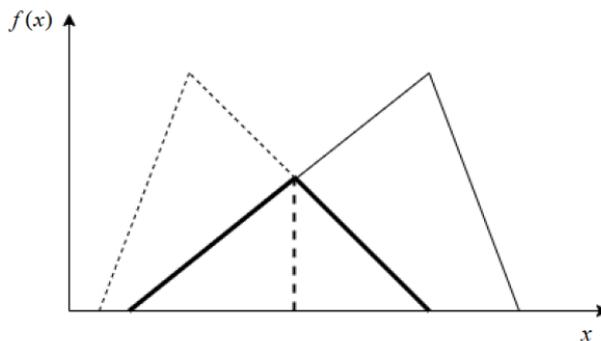


Рисунок 1. Пересечение графиков функций принадлежности продавца и покупателя

Figure 1. Intersection of the graphs of the seller's and buyer's belonging functions

Локальные соответствия по всем компонентам на втором этапе должны быть агрегированы в совокупную характеристику соответствия потребностей i -го продавца и k -го покупателя.

Для построения процедуры агрегирования целесообразно носители функций принадлежности привести к единой шкале для всех параметров от 1 до N . Для этого используем следующее простое преобразование:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \in [0;1], \quad (10)$$

где $x_{\min}; x_{\max}$ - соответственно нижняя и верхняя граница объединения носителей функций принадлежности параметров продавца и покупателя.

В дальнейшем верхний индекс (*) у преобразованной переменной будем опускать.

Оператором агрегирования обычно называют функцию, присваивающую некоторому кортежу действительных чисел из интервала $[0;1]$ одно действительное число из этого интервала [5]

$$agr: \bigcup_{n=1}^N [0;1]^n \rightarrow [0;1]. \quad (11)$$

Распространение получили различные операторы агрегирования в форме различных алгоритмов взвешенного суммирования [5]. Агрегирование векторов локальных соответствий (9) выполненное для некоторой группы однородных товаров позволит получать для каждого товара скалярную величину соответствия, которую можно интерпретировать как субъективную вероятность совершения сделки – продажи товара. Очевидно, что продавцу будет рекомендован товар с максимальной вероятностью продажи. Однако такой подход имеет ряд недостатков. Простые операторы агрегирования типа взвешенного среднего могут повлечь существенную потерю информации о соответствии. Более сложные операторы, например, интегральные операторы Шоке или Сугено [6], сохраняющие информацию о соответствии в максимальной степени, достаточно сложны в реализации.

Следуя методике, представленной в работе [7], предлагается в качестве оператора агрегирования использовать метод идеальной точки [8]. Решение задачи агрегирования сводится к максимизации критерия – квадрат расстояния в пространстве соответствий до идеальной точки:

$$\sum_{n=1}^N w_i (f_{\max}^n - f^n(x_i))^2 \rightarrow \max_x, \quad (12)$$

где w_i - весовые коэффициенты; f_{\max}^n - идеальная точка, соответствующая максимальному значению функции $f^n(x)$.

Такая постановка задачи должна учитывать, что множество значений параметров дискретно и ограничено. Такое предположение вполне оправдано, у продавца для выбора оптимального предложения имеется ограниченный набор товаров с конкретными значениями параметров. Формально ограничения выглядят следующим образом

$$x \in D, \quad (13)$$

где множество D включает конечный набор значений характеристических параметров товаров, которыми располагает продавец.

В постановке (12-13) задача представляет собой задачу векторной оптимизации, решения которой известны, но достаточно сложны [8].

Координаты идеальной точки легко определяются как максимумы функций принадлежности $f^n(x)$. Решение задачи (12-13) можно существенно упростить, используя конечный набор значений x характеристических параметров каждого товара. В этом случае для решения достаточно подставлять в (12) соответствующие значения x и вычислять значение критерия, которое можно рассматривать как квадрат расстояния вектора соответствия конкретного товара до идеальной точки. Таким образом, продавцу, в качестве рекомендации будет представлен товар с минимальным расстоянием.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим рынок конкретного однородного товара с конкретными характеристическими параметрами. Пусть таким рынком будет рынок обуви.

В качестве конкретных характеристических параметров возьмем размер обуви, цену и качество. Шкалой цен являются рубли, шкалой размера обуви является общепринятый российский размер, а шкалой качества – шкала от 1 до 5.

Покупатель формулирует желаемые значения параметров либо как промежуток количественных значений, либо как совокупность качественных значений. Например, покупатель хочет приобрести обувь размера 42 или 43, в ценовом промежутке от 1000 до 3000 тысяч рублей, среднего или лучшего качества. Гораздо удобнее работать не с естественными шкалами, а с нормирован-

ными. Для этого нормируем описанные ранее шкалы:

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \in [0;1]. \tag{14}$$

После применения правила нормировки мы получаем общую шкалу [0;1].

Вектор характеристических параметров имеет следующий вид:

$$q_j = (q_j^1, q_j^2, q_j^3), \tag{15}$$

где компоненты интерпретируются как q^1 – цена, определяемая на нормированной шкале [0;1]; q^2 – размер, определяемый на нормированной шкале [0;1]; q^3 – качество, определяемое наименованием производителя, которое расположено на нормированной шкале [0;1].

Предположим, что на рынке имеется четыре мелкооптовых покупателя $k=4$, чьи объемы запрашиваемого товара соответственно равны:

$$v_1 = 10, v_2 = 4, v_3 = 6, v_4 = 5.$$

Формализуем покупательский спрос, т.е. вектор лингвистических переменных, четырех покупателей в виде:

$$\tilde{g}_k = (\tilde{g}_k^1, \tilde{g}_k^2, \tilde{g}_k^3), \tag{16}$$

Каждая переменная имеет кусочно-линейные функции принадлежности. Для обозначения функции принадлежности будем использовать треугольную функцию, которую можно задать используя следующие значения: $x_{\min}, x_{med}, x_{\max}$. Нормированная треугольная функция принадлежности задается в виде $(a; m; b)$, где a, b – соответственно левая и правая границы носителя, а m – мода треугольника.

Графики нормированных функций принадлежности желаний покупателей по цене, размеру и качеству представлены на рисунке 2, рисунке 3, рисунке 4, рисунке 5:

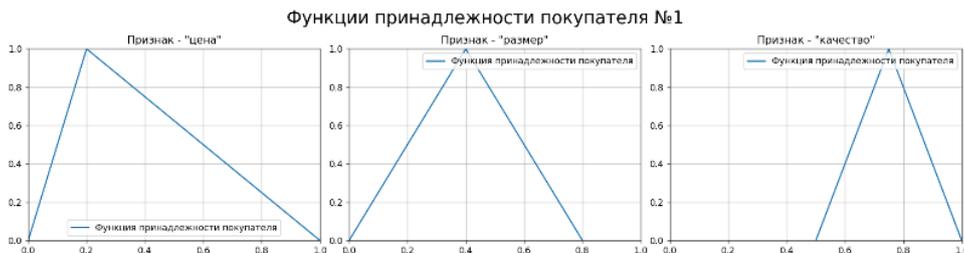


Рисунок 2. Функции принадлежности желаний покупателя №1

Figure 2. Buyer's desire belonging functions №1

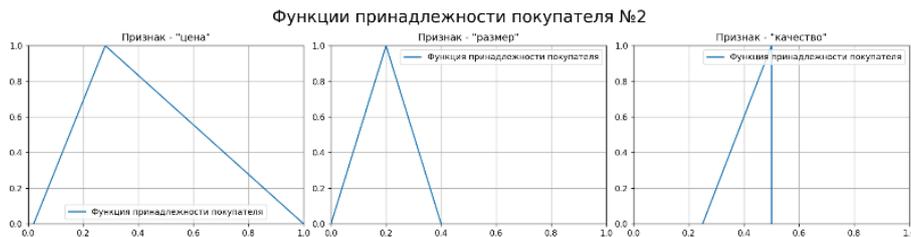


Рисунок 3. Функции принадлежности желаний покупателя №2

Figure 3. Buyer's desire belonging functions №2

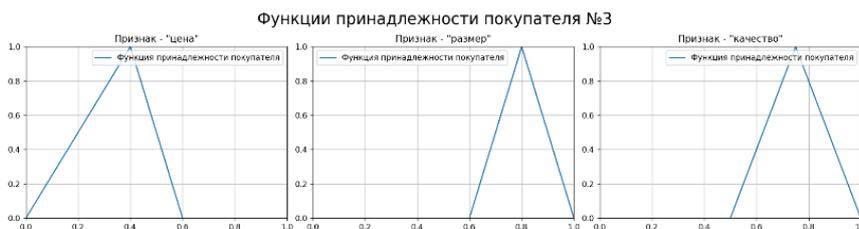


Рисунок 4. Функции принадлежности желаний покупателя №3

Figure 4. Buyer's desire belonging functions №3

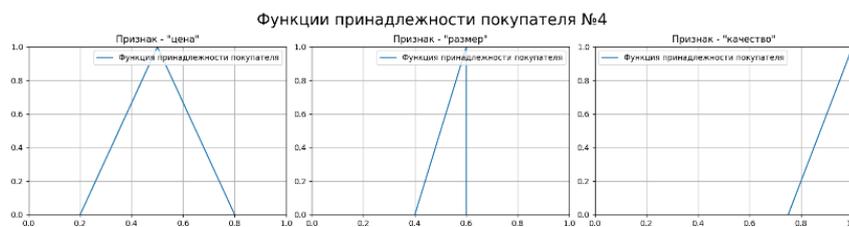


Рисунок 5. Функции принадлежности желаний покупателя №4

Figure 5. Buyer's desire belonging functions №4

Аналогично спросу, продавец должен формализовать свои возможности по цене, размерам и качеству, т.е. вектор лингвистических переменных, в следующем виде:

$$\tilde{q} = (\tilde{q}^1, \tilde{q}^2, \tilde{q}^3), \tag{17}$$

Графики функций принадлежности желаний продавца по цене, размеру и качеству представлены на рисунке 6:

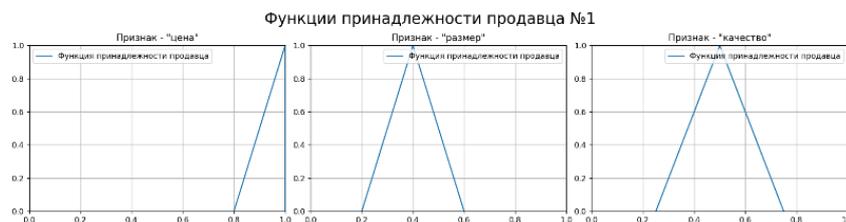


Рисунок 6. Функции принадлежности желаний продавца

Figure 6. The belonging functions of the seller's desires

Представим промежуток [0;1] с помощью регулярного разбиения на достаточно большое число малых промежутков. Пусть число малых промежутков будет 10.

В полученных узлах необходимо рассчитать с помощью формулы для нахождения значений обобщенного спроса покупателей по каждой из компонент:

$$f_g^n(x) = \sum_{k=1}^k f_{gk}^n(x) \cdot w_k, n = 1, \dots, N, \tag{18}$$

Графики функций для каждой компоненты обобщенного спроса показаны на рисунке 7:



Рисунок 7. Функции принадлежности обобщенного спроса покупателей

Figure 7. Membership functions of generalized customer demand

Для того чтобы определить характеристики однородного товара, который бы больше всего соответствовал спросу на рынке и предложению продавца, было решено использовать в качестве критерия выбора компромисс между максимумом вероятности сделки и максимумом ее выгоды. Для этого необходимо найти пересечение функции

принадлежности компонент векторов обобщенного спроса и функции принадлежности компонент вектора возможностей продавца и выбрать максимальные точки пересечения этих функций принадлежности по формуле (2). Полученные максимальные точки пересечения представлены на рисунке 8:

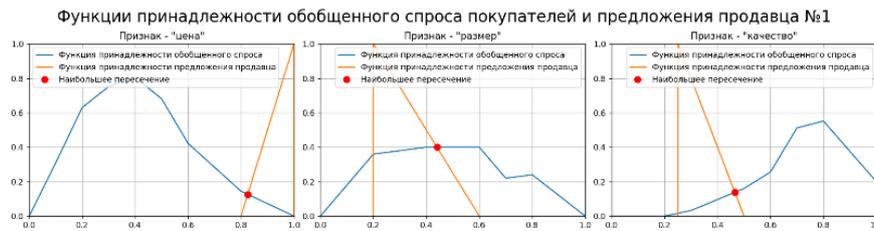


Рисунок 8. Функции принадлежности обобщенного спроса покупателей и предложения продавца

Figure 8. The belonging functions of generalized buyer demand and seller supply

Необходимо учитывать то, что в пересечения могут не попадать реальные значения признаков товаров, необходимые покупателю, поэтому будут подбираться

$$d(x^{\max}, x^s) = \sqrt{(x_1^{\max} - x_1^s)^2 + (x_2^{\max} - x_2^s)^2 + (x_3^{\max} - x_3^s)^2}. \quad (19)$$

Далее полученные расстояния необходимо отсортировать по возрастанию, после чего можно составить таблицу рейтинга товаров. Товары, находящиеся в начале таблицы, будут больше всего соответствовать покупательскому спросу на маркетплейсе.

Выводы

Данная статья посвящена автоматизированию процесса формирования товарного предложения продавца на маркетплейсе, которое в большей степени соответствовало бы покупательскому спросу.

В процессе выполнения были решены следующие задачи:

наиболее приближенные к реальности значения. Для этого будет использовано Евклидово расстояние, рассчитанное для каждого товара по формуле:

– Проведена формализация спроса и предложения на основе нечетких множеств и лингвистических переменных.

– Реализован алгоритм для формирования товарного предложения продавца

Полученный алгоритм в дальнейшем может быть использован как один из виджетов на сервисе поддержки продавца, в котором на вход будут поступать данные анализа пользовательского поведения, желания продавца и его товары, а на выходе продавец будет получать сформированное предложение в виде рейтинга товаров, которые будут иметь высокий спрос на электронной торговой площадке среди покупателей.

Литература

1. Шендрик П.В. Теоретические особенности функционирования маркетплейсов / П.В. Шендрик // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 10-124. – С. 74.
2. Сысоева С.В., Бузукова Е.А. Управление ассортиментов в рознице. Категорийный менеджмент. – Питер; СПб.; 2010 ISBN 978-5-49807-586-0
3. Матвеев М.Г. Информационные технологии формирования предложения на электронной торговой площадке с технологией маркетплейс. Экономика и математические методы. Т.57, №1. 2021. С. 105-112.
4. Матвеев М.Г. Анализ взаимодействия в системе продавец-покупатель на основе числовой меры парного соответствия. Вестник ВГУ. Серия «Системный анализ и информационные технологии». №3, 2019. С. 94-103.
5. Леденева Т.М., Левкина И.Н. Обзор основных классов операторов порядкового взвешенного агрегирования. Вестник ВГУ. Серия «Системный анализ и информационные технологии». №1, 2022. С. 5-31.
6. Matveev M., Podvalny S. (2019). Models of centralized equipment procurement based on supplier-consumer matching. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). *IEEE*, 151–154.
7. Матвеев М.Г. Концепция матчинга на основе моделирования нечетких отношений / М.Г. Матвеев, Н.А. Алейникова, А.А. Громковский, В.В. Коротков // Инженерные технологии, №4 (4), 2023. С. 43-56.
8. Ю.К. Машунин. Теория и методы принятия оптимальных решений по множеству критериев в инженерных системах. КноРус. 2023. – 339с.

References

1. Shendrik P.V. Theoretical Features of Marketplace Functioning / P.V. Shendrik // *International Research Journal*. — 2022. — No. 10-124. — P. 74.
2. Sysoeva S.V., Buzukova E.A. *Assortment Management in Retail. Category Management*. — Piter; St. Petersburg.; 2010 ISBN 978-5-49807-586-0.
3. Matveev M.G. Information Technologies for Forming Offers on an Electronic Trading Platform with Marketplace Technology. *Economics and Mathematical Methods*. Vol. 57, No. 1. 2021. P. 105-112.
4. Matveev M.G. Analysis of Seller-Buyer Interaction Based on a Numerical Measure of Pairwise Matching. *Bulletin of VSU. Series "Systems Analysis and Information Technologies"*. No. 3, 2019. P. 94-103.
5. Ledeneva T.M., Levkina I.N. Review of the Main Classes of Ordinal Weighted Aggregation Operators. *Bulletin of VSU. Series "Systems Analysis and Information Technologies"*. No. 1, 2022. P. 5-31.
6. Matveev M., Podvalny S. (2019). Models of Centralized Equipment Procurement Based on Supplier-Consumer Matching. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation, and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 151–154.
7. Matveev M.G. Matching Concept Based on Fuzzy Relations Modeling / M.G. Matveev, N.A. Aleynikova, A.A. Gromkovsky, V.V. Korotkov // *Engineering Technologies*, No. 4 (4), 2023. P. 43-56.
8. Y.K. Mashunin. *Theory and Methods for Optimal Decision-Making by Multiple Criteria in Engineering Systems*. Knorus. 2023. — 339 pages.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Дрюкова Полина Викторовна	Студент – магистр, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», dpv1202@mail.ru
Матвеев Михаил Григорьевич	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», заведующий кафедрой «Информационных технологий 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)
Driukova Polina Viktorovna	master's student, Voronezh State University, dpv1202@mail.ru
Matveev Michael Grigorievich	DSc, Professor, Voronezh State University, Head of the Department of Information Technology Management, mgmatveev@yandex.ru ORCID 0000-0002-6528-6420

статья поступила в редакцию 08.08.2024	одобрена после рецензирования 02.09.2024	принята к публикации 13.09.2024
the article was submitted 08.08.2024	approved after reviewing 02.09.2024	accepted for publication 13.09.2024

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО КОНСУЛЬТАНТА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ЦЕНТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Людмила Анатольевна Коробова[✉] 1 Lyudmila_korobova@mail.ru
Андрей Ильич Головин 1 agolovin2011@gmail.com

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий", проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Практически каждый житель России сталкивался с системой здравоохранения, в которой есть как положительные, так и отрицательные стороны. Опыт специалистов медицинского центра, основанный на богатой практике как в государственных медучреждениях, так и в частных клиниках, позволяет эффективно применять положительно зарекомендовавшие себя способы и методы лечения отечественной медицины. Исторически сложилось так, что медицинские консультации проводились между пациентами и их лечащими врачами во время клинических встреч. Однако некоторые барьеры могут препятствовать эффективному общению в клинических условиях. Например, пациенты и лица, осуществляющие за ними уход, часто сталкиваются с большими трудностями при получении своевременной медицинской консультации и информации от поставщиков медицинских услуг из-за длительного ожидания записи на приём. На сегодняшний день компании все чаще внедряют в бизнес процессы различные IT-технологии. Одним из самых популярных инструментов является использование чат-ботов. Технология, которая позволяет создать диалоговых агентов, появилась только в прошлом столетии, а самые впечатляющие достижения в области искусственного интеллекта произошли только в последние два десятилетия. Пока это новая область для пользователей. Чат-боты – это виртуальные собеседники, программный продукт, который моделирует человеческий диалог посредством заранее прописанных вариантов ответов. В настоящее время чат-боты набирают все большую популярность как в бизнес компаниях, так и в повседневной жизни любого человека. Распространение чат-ботов началось с массового использования интернета, и в частности социальных сетей.

Ключевые слова: чат-бот, разработка, искусственный интеллект, медицинский центр, Telegram, обучение, ChatGPT, мессенджер.

Для цитирования: Коробова Л. А., Головин А. И. Разработка виртуального консультанта для медицинского центра с использованием искусственного интеллекта // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 23-34.

Research article

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL CONSULTANT FOR A MEDICAL CENTER USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Lyudmila A. Korobova[✉] 1 Lyudmila_korobova@mail.ru
Andrey I. Golovin 1 agolovin2011@gmail.com

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

Abstract. Almost every resident of Russia has encountered a healthcare system that has both positive and negative sides. The experience of the medical center's specialists, based on extensive practice both in public medical institutions and in private clinics, allows them to effectively use proven methods and methods of treatment of domestic medicine. Historically, medical consultations occurred between patients and their physicians during clinical encounters. However, some barriers may hinder effective communication in clinical settings. For example, patients and their caregivers often face great difficulty in obtaining timely medical advice and information from health care providers due to long wait times for appointments. Today, companies are increasingly introducing various IT technologies into business processes. One of the most popular tools is the use of chat-bots. The technology that makes it possible to create conversational agents only emerged in the last century, and the most impressive advances in artificial intelligence have only occurred in the last two decades. This is still a new area for users. Chat-bots are virtual interlocutors, a software product that simulates human dialogue through pre-written answer options. Currently, chat-bots are gaining more and more popularity both in business companies and in the everyday life of any person. The spread of chat-bots began with the massive use of the Internet, and in particular social networks.

Keywords: chat-bot, development, artificial intelligence, medical center, Telegram, training, ChatGPT, messenger.

For citation: Korobova L. A., Golovin A. I. Development of a virtual consultant for a medical center using artificial intelligence. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 23-34. (In Russ.).

Введение

В современном бизнес-ландшафте внедрение диалоговых систем искусственного интеллекта открывает новые горизонты для компаний, стремящихся к инновациям и оптимизации своих процессов [1, 2]. Эти цифровые помощники, искусно имитирующие человеческое общение, становятся незаменимыми союзниками в построении эффективных коммуникаций с клиентами.

Одним из ключевых достоинств таких систем является их способность вести естественный диалог, создавая иллюзию общения с живым собеседником. Это качество позволяет установить более тесную связь между брендом и потребителем, делая взаимодействие не только функциональным, но и эмоционально комфортным.

Неоспоримым преимуществом виртуальных консультантов является их неутомимость. В отличие от человеческих ресурсов, ограниченных физиологическими потребностями, эти цифровые сущности готовы к диалогу в любой момент, будь то полночь или рассвет. Такая круглосуточная доступность не только повышает удовлетворенность клиентов, но и существенно разгружает штатных специалистов, позволяя им сосредоточиться на более сложных и нестандартных запросах.

Внедрение подобных технологий также способствует значительному повышению производительности бизнес-процессов. Автоматизация рутинных операций освобождает человеческий потенциал для решения творческих и стратегических задач, что в конечном итоге ведет к качественному скачку в развитии компании [3].

Немаловажным аспектом является и экономическая эффективность использования диалоговых систем. Снижение нагрузки на человеческие ресурсы позволяет оптимизировать расходы на персонал, особенно в сфере клиентской поддержки, где традиционно требуется обеспечение непрерывного сервиса.

Использование чат-бота в компании может помочь в сфере продаж и консультации клиентов. Как показывает практика, в основном клиенты обращаются в нерабочее время. Чат-бот работает гораздо быстрее обычного оператора, и поэтому он может предоставлять ответы нескольким пользователям одновременно. Более того, чат-бот отвечает мгновенно, благодаря встроенным алгоритмам. Все это приводит к увеличению удовлетворенности клиентов и привлечению новых пользователей [4].

Примером использования искусственного интеллекта как виртуального консультанта в медицине можно привести онлайн-помощников и чат-ботов. Их задачей является консультация клиентов без участия сотрудников. Такие приложения предоставляют ответы на самые часто задаваемые вопросы или дают персональные советы. Примером таких приложений являются чат-боты для помощи на различных сайтах, боты помощи в чат-поддержке маркетплейсов и др. Они быстро предоставляют консультацию и способствуют повышению удовлетворенности клиентов.

Методология

Технологии для разработки чат-бота. Чтобы реализовать и создать новые чат-боты, на рынке представлено больше количество разных платформ.

Одной из таких платформ является Microsoft Bot Framework. Эта среда реализации включает структурированную систему администрирования. Она разрешает формировать, проверять и распоряжаться чат-ботами в одном месте. С поддержкой этой среды реализации можно сопрягать чат-ботов со всевозможными площадками взаимодействия писем. Microsoft Bot Framework также включает в себя подключенные компоненты, несколько языков программирования, а также применяет машинное тестирование.

Wit.ai является бесплатной площадкой для реализации чат-ботов. Она пользуется известностью среди многих разработчиков по всему миру. Эта площадка позволяет формировать чат-ботов, которые могут контактировать с пользователями как реальный человек. Также спецификой этой среды разработки является использование обработки естественного языка.

Следующей платформой для разработки чат-бота является платформа IBM Watson Assistant. Она позволяет создавать банковских, оптовых и голосовых чат-ботов для Android. Эта среда имеет готовый ресурс для цифровой торговли, банковского дела и обслуживания клиентов [3, 4]. Это делает ее безупречным выбором для менеджмента. Площадка также применяет превосходства машинного обучения для оптимального решения запросов пользователей. Эта среда для разработки использует модернизированный алгоритм машинного обучения, роботизированный прогностический анализ, графический интерфейс и поддержку 13 языков.

Среди популярных площадок можно выделить диалоговое окно Google Cloud. Она

способна анализировать всевозможные типы сведений, такие как аудио и текст. Google Cloud Dialogflow оснащена функцией обработки естественного языка. с использованием этой площадки можно запросто обучить чат-ботов интерпретировать аспекты человеческой речи.

Также бесплатной средой разработки является платформа Rasa Stack. Эта платформа имеет два основных модуля: Rasa Core и Rasa NLU. Первый предназначен для разработки диалоговых ботов, а второй оснащен механизмом обработки естественного языка. Используя возможности машинного обучения, Rasa Stack может обучать чат-ботов разумному общению с людьми. Помимо управления контекстными разговорами, эта платформа также может определять намерения и создавать индивидуальные модели ботов.

Botpress, как и Rasa Stack, является бесплатной платформой для разработки чат-ботов. Одной из наиболее примечательных особенностей этой платформы является ее удобный и простой пользовательский интерфейс, который позволяет нетехническим пользователям управлять ботами после их разработки. Он также поставляется с расширенными функциями, такими как Dialog Manager и Flow Builder, которые позволяют разработчикам создавать умных ботов и устранять недостатки диалога. Также есть возможность разрабатывать собственные чат-боты, интегрируя сторонние интерфейсы прикладного программирования (API). Ботов, разработанных с помощью Botpress, можно использовать в Slack, Telegram, Skype, Twilio, Facebook Messenger и WeChat.

Telegram – это бесплатная и универсальная система для мгновенного обмена сообщениями, которая также включает функции VoIP. Она позволяет отправлять и получать текстовые сообщения, голосовые и видео сообщения, а также существует возможность вести приватный или групповой диалог, создавать или подписываться на каналы и создавать конференции. Кроме того, Telegram поддерживает обмен различными файлами и мультимедийными материалами разного формата. Благодаря использованию ботов функциональность приложения практически безгранична. Этот мес-

сенджер можно скачать и установить на различные платформы, такие как Android OS, iOS, Windows, macOS и другие. Благодаря таким преимуществам, как конфиденциальность, открытый протокол и API, отсутствие платных подписок и рекламы, а также высокий уровень безопасности, Telegram стал основным выбором для выполнения выпускной квалификационной работы.

TelegramBotAPI – это мощный инструмент для создания и управления Telegram-ботами. С его помощью разработчики могут легко интегрировать ботов в свои приложения и системы, а также взаимодействовать с ними через API. Общаться с серверами Телеграмм-бот может двумя способами: - long polling – бот постоянно обращается к серверу Телеграмм и проверяет есть ли новые сообщения; - webhook – по мере поступления новых сообщений сервер Телеграмм отправляет их боту.

Наиболее удобный и практичный вариант – использовать постоянный опрос сервера с технологией Long Polling, несмотря на её недостаток, заключающийся в постоянной отправке запросов каждые 100 миллисекунд. Эта технология выполняет циклические запросы для проверки наличия обновлений. Если происходит какое-либо событие, сервер отправляет ответ на запрос пользователя без ожидания окончания таймера и возвращается в начало цикла для ожидания следующего события.

При использовании способа Webhook в мессенджере Telegram, сам мессенджер уведомляет о запросе пользователя, что исключает необходимость постоянной отправки запросов на сервер для проверки новых событий. Однако для использования этой функции необходимо установить полноценный веб-сервер на персональный компьютер, с которого запускается бот, а также обеспечить наличие собственного SSL-сертификата (Secure Sockets Layer), поскольку webhook Telegram работает через безопасный протокол HTTPS.

Все запросы к Telegram Bot API осуществляются через протокол HTTPS в следующем виде:

`https://api.telegram.org/bot<TOKEN>/METHOD_NAME.`

Принцип работы взаимодействия бота и пользователя показан на рисунке 1.

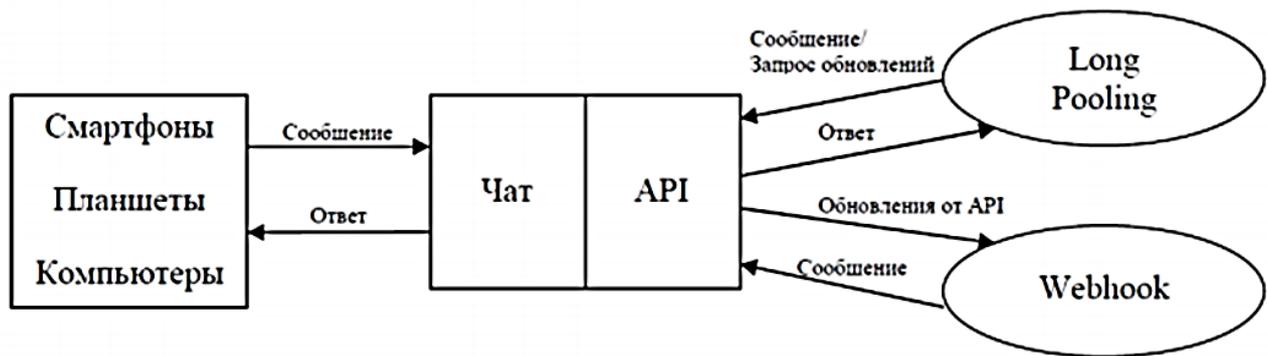


Рисунок 1. Принцип работы бота в мессенджере Telegram

Figure 1. How the bot works in the Telegram messenger

Разработка концептуальной модели.

Чтобы описать работу программного обеспечения, нужно создать концептуальную модель разрабатываемого приложения [5]. Эта модель должна включать информацию обо всех участниках системы.

Сначала нужно определить актёров, взаимодействующих с ПП, и прецеденты. Актёры – это сущности, играющие определённые роли в системе. Прецедент – действие, которое актёр может совершить в системе для достижения своей цели.

Актёрами в данной системе являются пользователи приложения – будущие пациенты медицинского центра, которым требуется рас-

познать симптомы и осуществить запись на приём, а также администратор – человек, который будет управлять записями на приём [5, 6].

Чтобы наглядно продемонстрировать взаимодействие участников и прецедентов, используется диаграмма прецедентов или вариантов использования, показанная на рисунке 2.

Эта диаграмма в рамках UML отражает связи между действующими лицами и прецедентами и является составной частью модели прецедентов, предназначенной для описания системы на концептуальном уровне.

Процесс самодиагностики и дальнейшей записи можно представить в виде диаграммы последовательности (рисунок 3).

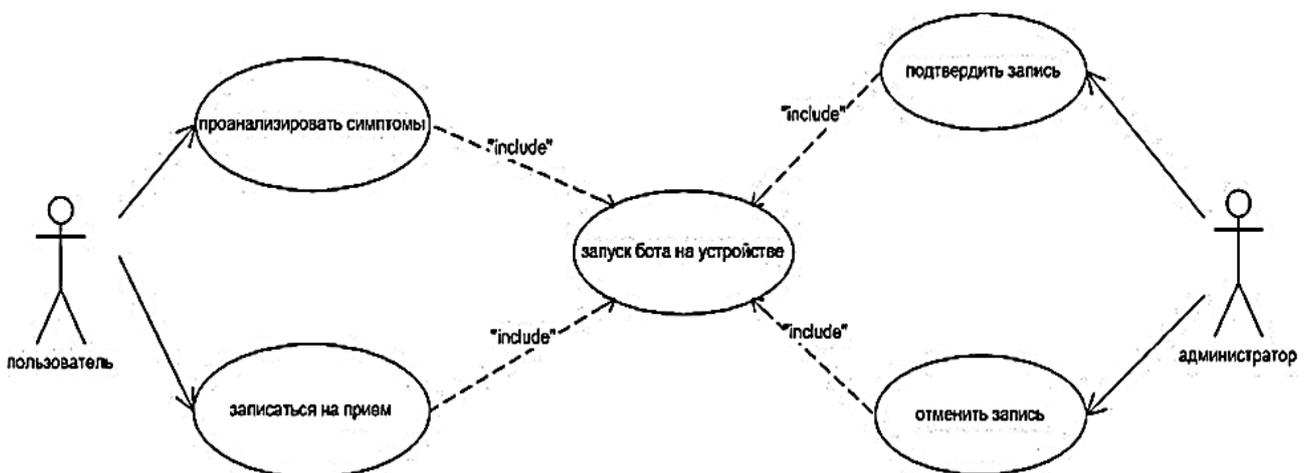


Рисунок 2. Диаграмма прецедентов

Figure 2. Use case diagram

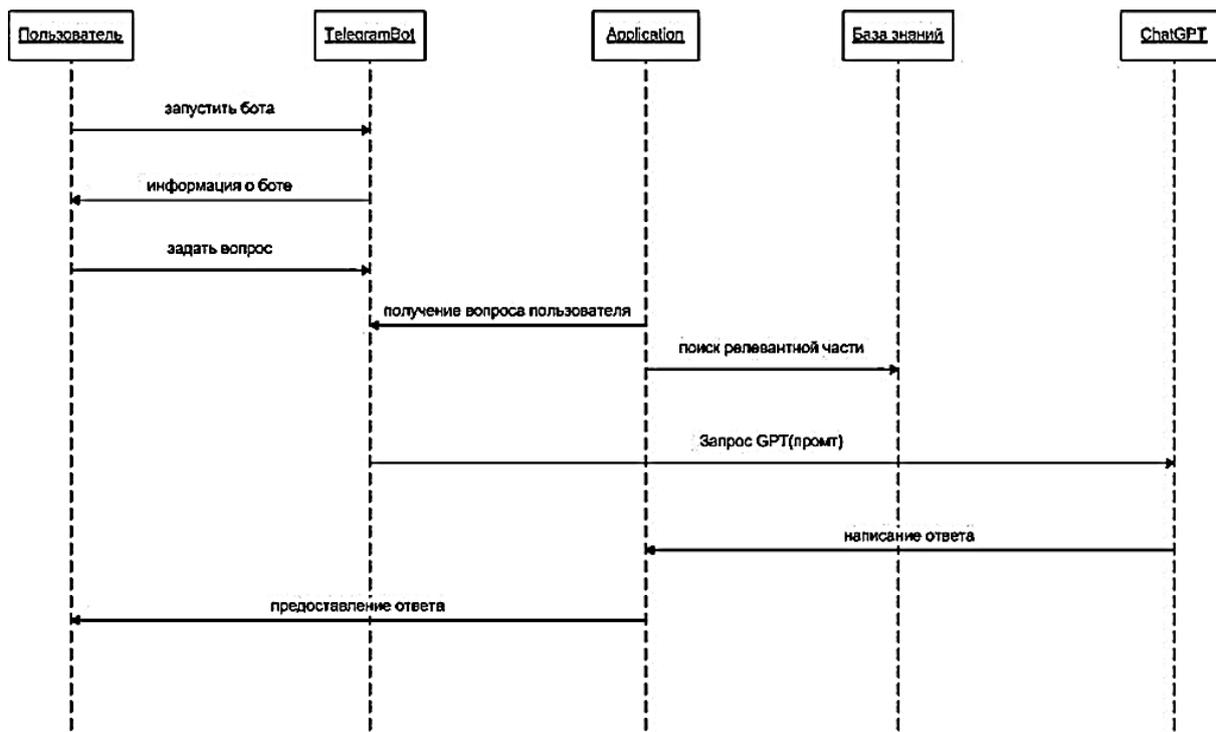


Рисунок 3. Диаграмма последовательности прецедента «Проанализировать симптомы»

Figure 3. Sequence diagram of the «Analyze Symptoms» use case

Диаграмма последовательности — это инструмент, позволяющий описать поведение системы в разных ситуациях [6, 7]. Она демонстрирует, как объекты взаимодействуют друг с другом в определённом контексте. Ключевые элементы этой диаграммы включают объекты (например, пользователь, записывающийся к врачу, чат-бот и база знаний), «линии жизни», показывающие течение времени, и стрелки, иллюстрирующие обмен сигналами или сообщениями между объектами.

Модели на диаграммах рисунков 2 и 3 процесса работы программы-бота позволили представить бот на уровне понятий информационной среды. Основным назначением бота

является помощь сотрудникам медицинского центра при записи пациентов на прием к врачу с использованием искусственного интеллекта и применением для этого современных средств разработки.

Методы и средства

Интеграция ChatGPT в Телеграмм-бот.

Для внедрения ChatGPT в Телеграмм бот требуется официальный пакет python openai для запроса API ChatGPT [4, 6]. Для начала требуется установить пакет openai python с помощью библиотеки «pip3 install openai» (рисунок 4).

```

import os
import openai

openai.api_key = os.getenv("OPENAI_API_KEY")

def request_chat_gpt(user_message):
    try:
        completion = openai.ChatCompletion.create(
            model="gpt-3.5-turbo",
            messages=[
                {"role": "user", "content": user_message}
            ]
        )
        return completion.choices[0].message['content']
    except Exception as e:
        print(f"An error occurred: {e}")
        return "" # Return an empty string or handle the error appropriately
    
```

Рисунок 4. Пример кода для установки библиотек

Figure 4. Sample code for installing libraries

После этого на сайте openAI требуется получить уникальный токен. Этот ключ API помещается в .env. файл, и добавляется следующая строка (рисунок 5):

```
OPENAI_API_KEY="<your_openai_api_key>"
```

Рисунок 5. Получение API-ключа

Figure 5. Obtaining an API key

Для того чтобы искусственный интеллект понимал, как именно он должен предоставлять ответы на запросы, ему заранее нужно прописать роль [7, 8]. Это описание роли называется промт. Промт (от англ. prompt) – это запрос, инструкция или входные данные, которые отправляются нейросети для выполнения конкретной задачи. На рисунке 6 представлена инструкция для корректной работы чат-бота.

Ты администратор клиники, тебя зовут Добродоктор и ты отвечаешь на вопросы пациентов в чате. Твоя задача уточнить симптомы у пациента и записать его на прием к врачу. Если пациент сообщил свои симптомы, то спроси его фамилию, имя и телефон и запиши его на прием к врачу и скажи ему что он записан на прием к врачу. У тебя есть документ со всеми материалами о симптомах разных болезней. Все вопросы задавай только по данному документу и ничего не придумывай. Не упоминай документ или его отрывках при ответе, клиент ничего не должен знать о документе, по которому ты отвечаешь. Не употребляй фразы вида "По нашему документу", "в нашем документе", "в документе с материалами". Не отвечай на вопросы, которые не относятся к теме этого чата.

Рисунок 6. Инструкция для работы чат-бота

Figure 6. Instructions for the chat-bot

ChatGPT должен обучаться и использовать необходимую информацию для того, чтобы составить нужный ответ. Он может это делать с помощью информации, которая собрана в единую базу знаний (БЗ). БЗ может представлять собой учебники, книги, статьи и другие файлы.

Теперь понятно, что должен делать чат-бот, поэтому требуется найти для него подходящую литературу, на которую он будет опираться при формировании ответа. В нашем случае в качестве базы знаний используется книга «Handbook of signs and symptoms» (рисунок 7).

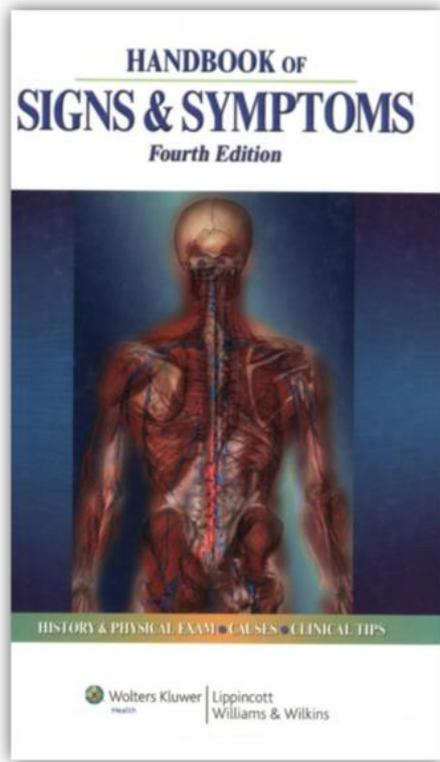
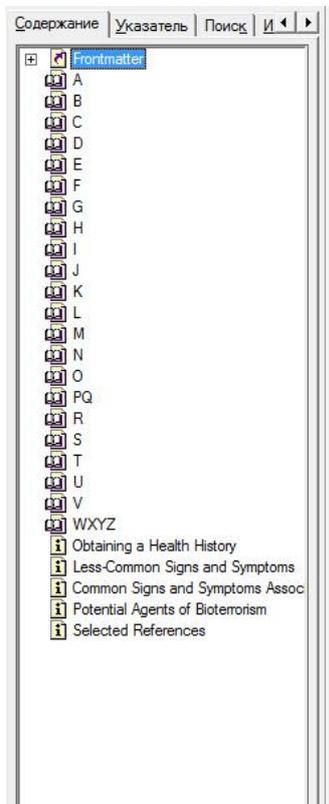


Рисунок 7. База знаний для чат-бота

Figure 7. Knowledge base for the chat-bot

Регистрация чат-бота на платформе Telegram. Вначале работы с TelegramBotAPI требуется зарегистрировать бота в мессенджере Telegram. Для этого нужно обратиться к официальному боту @BotFather, с помощью которого создаются боты, и следовать его инструкциям. После регистрации получаем уникальный API-ключ, который станет «пропуском» для взаимодействия с TelegramBotAPI.

Основные термины и концепции TelegramBotAPI включают команды [7, 8]:

- «Updates»: в этом случае API передаёт информацию о событиях, которые происходят в боте, в виде обновлений. Они могут вклю-

чать в себя новые сообщения, изменения в состоянии чата и другие события.

- «Messages»: является одним из ключевых объектов API. Все взаимодействия с пользователями происходят через обмен сообщениями.

- «Commands»: команды позволяют пользователям взаимодействовать с чат-ботом, вызывая определённые действия, например, нажимая кнопку «/start» для запуска работы бота.

Пример регистрации чат-бота в @BotFather представлен на рисунке 8.

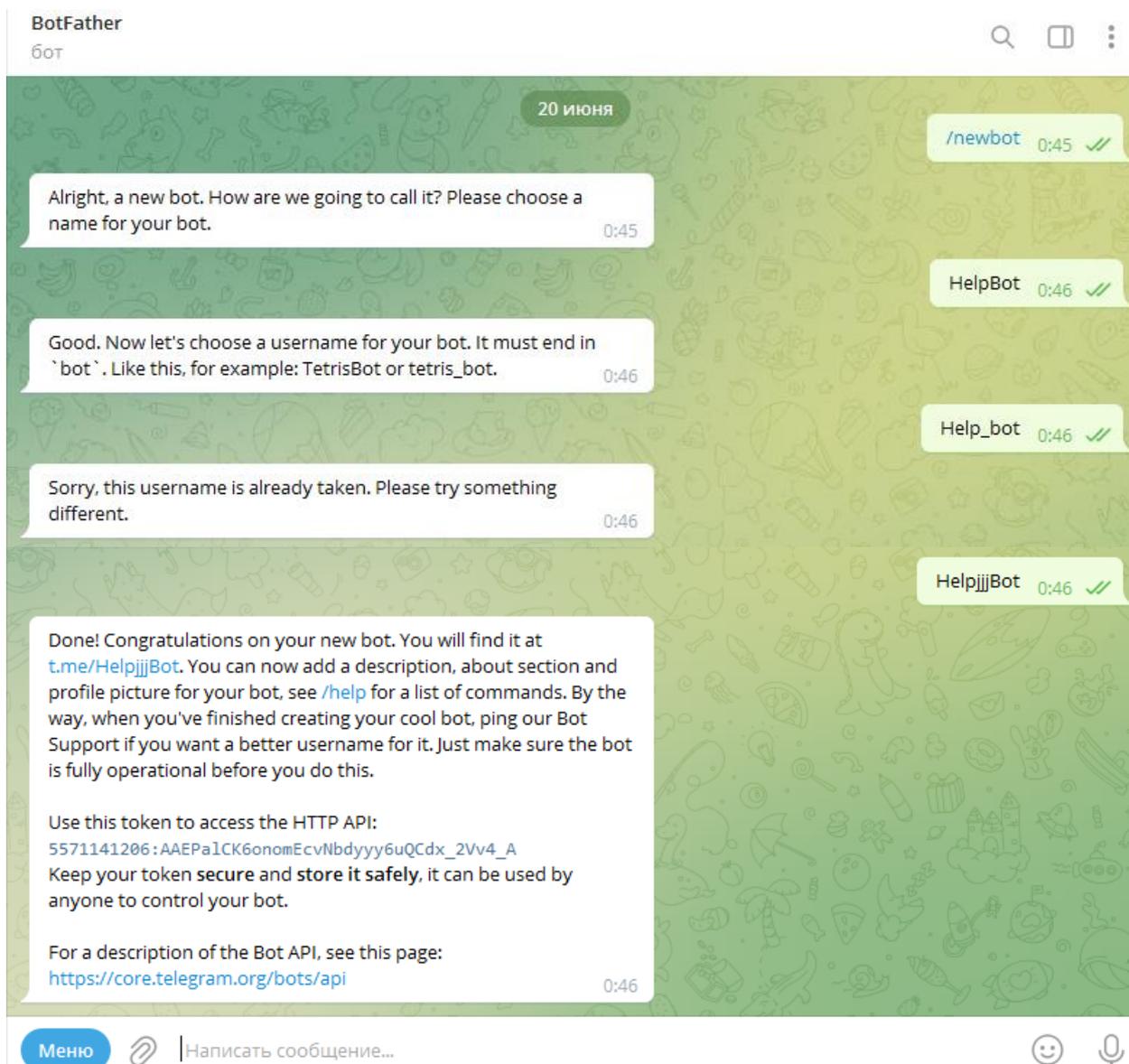


Рисунок 8. Пример регистрации чат-бота в @BotFather

Figure 8. Example of registering a chat-bot in @BotFather

Название для бота требуется придумать оригинальное, так как на платформе существует большое количество различных ботов, которые тем или иным образом уже внедрены в различные компании [8, 9].

После ввода имени предлагается большой список команд, с помощью которых можно изменить бота, например, добавить фото к чат-боту, информацию о самом боте и многие другие команды [8].

После настроек чат-бота на стороне Telegram и получения токена можно приступить к разработке и написанию функциональности бота [10].

Описание пользовательского интерфейса. Когда диалог с чат-ботом открывается впервые, автоматически отправляется команда «/start» (рисунок 9). Бот обрабатывает эту команду и возвращает пользователю заранее определённое разработчиком сообщение [11].

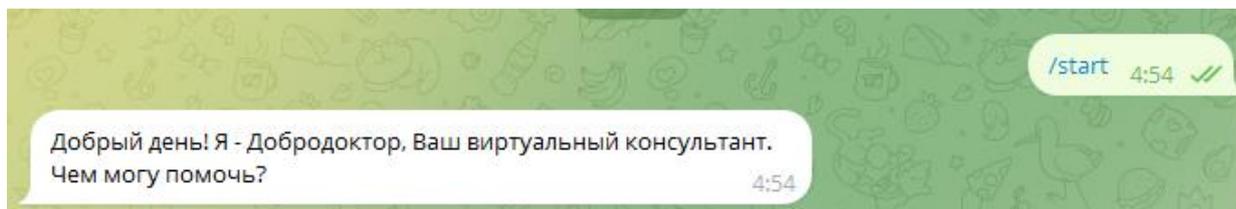


Рисунок 9. Стартовый интерфейс бота

Figure 9. Bot start interface

Далее пользователь печатает свой запрос. Запрос пользователя – это симптомы, которые его беспокоят на текущий момент. К примеру, пользователь вводит запрос, что у

него болит живот. ChatGPT в этот момент производит поиск совпадений в базе знаний и предоставляет уточнение пользователю (рисунок 10).

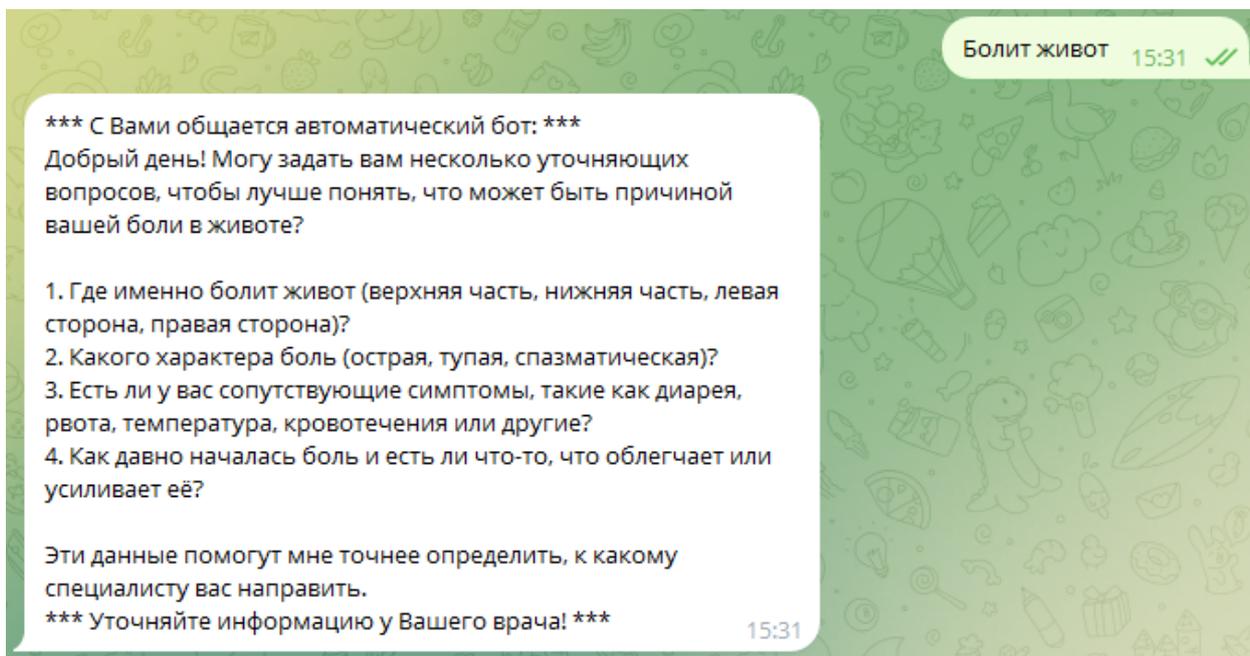


Рисунок 10. Уточнение симптомов

Figure 10. Clarification of symptoms

Далее пользователь вводит ответы на вопросы бота. Бот также снова присылает уточнения для уточнения симптомов, чтобы

предварительный диагноз был более точный (рисунок 11).

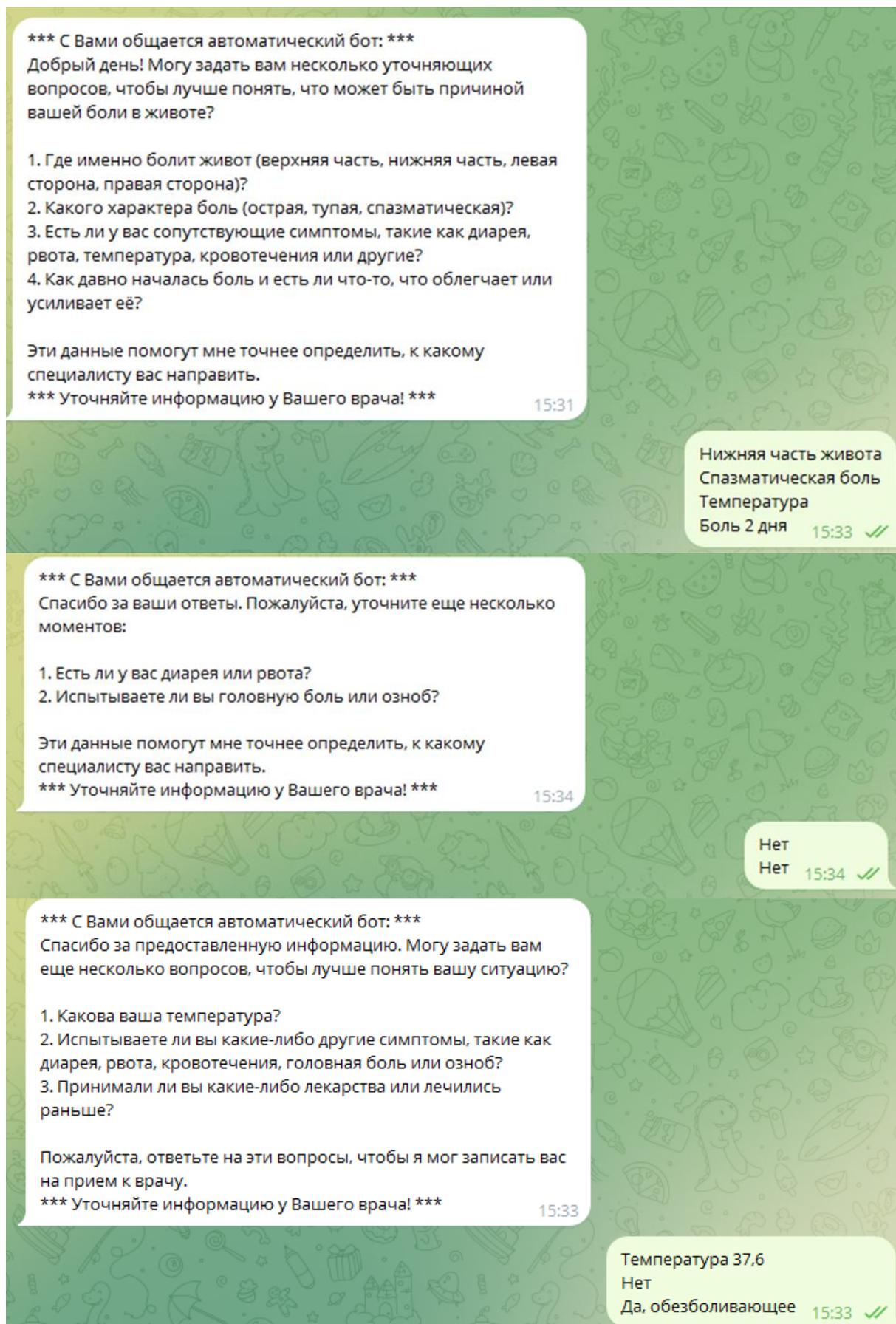


Рисунок 11. Демонстрация работы чат-бота
Figure 11. Demonstration of the chat-bot in action

После всех уточнений бот уточняет дополнительные данные у пользователя для записи и записывает его на прием к специали-

сту для дальнейшего обследования в клинике (рисунок 12).

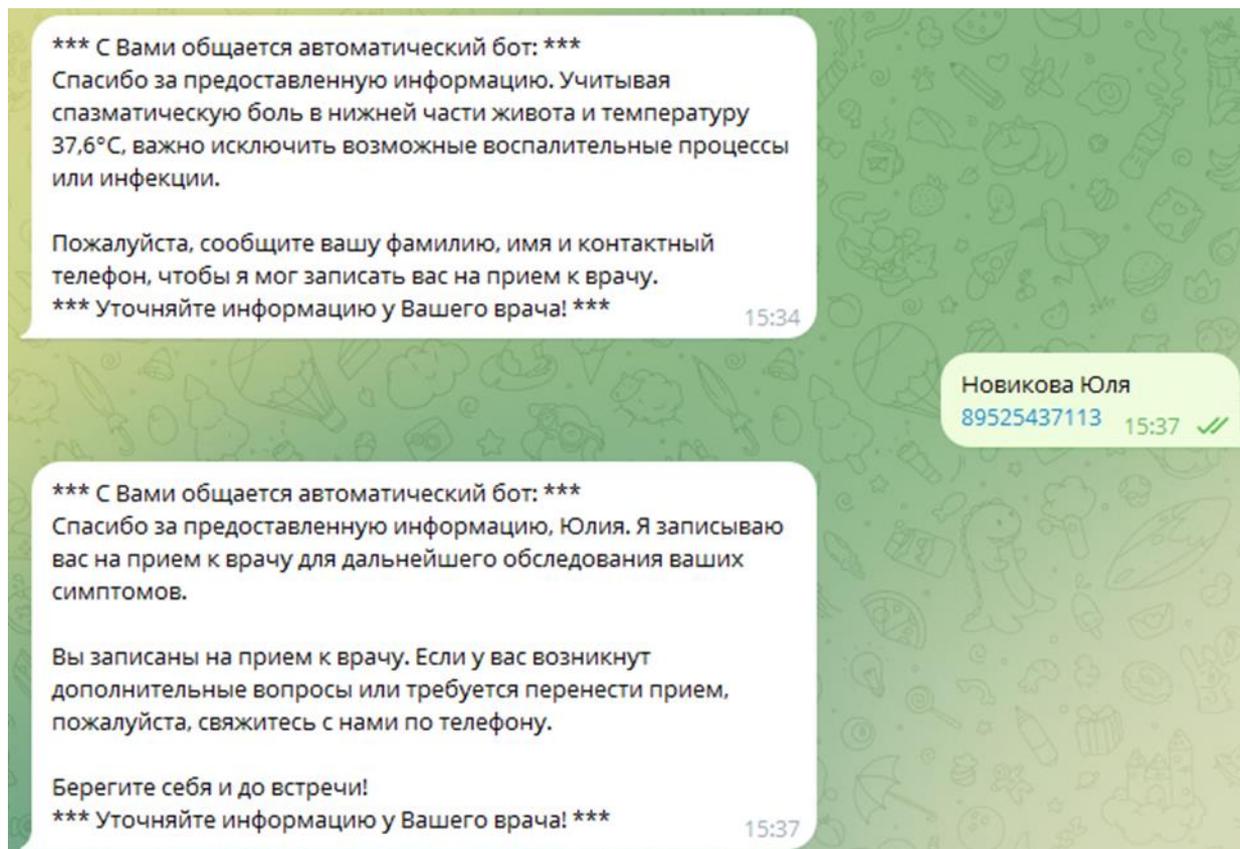


Рисунок 12. Запись на прием

Figure 12. Making an appointment

Заключение

На сегодняшний день существует большое количество платформ и конструкторов, предназначенных для разработки диалоговых систем. В этом исследовании был проведен анализ существующих платформ для создания и реализации чат-ботов. Была выбрана платформа Telegram и сделаны выводы о том, что данная платформа в полной мере закрывает задачи разработанного чат-бота.

Диалоговые системы — это компьютерные системы, с которыми пользователи общаются на естественном языке. Они состоят из 3 ключевых компонентов: модуля понимания естественного языка (NLU), диалогового менеджера (DM) и генератора естественного языка (NLG). Диалоговые системы различаются по своим функциям и принципам работы, что приводит к множеству их классификаций.

Чат-боты могут облегчить пользователям поиск информации, мгновенно отвечая на во-

просы и запросы — посредством текстового ввода, голосового ввода или того и другого. Это упрощает процесс поиска и избавляет от необходимости проводить ручные исследования.

Чат-боты с искусственным интеллектом доступны для круглосуточного обслуживания клиентов, 7 дней в неделю и могут получать ценную информацию о взаимодействии пользователей с процессами компании, чтобы вести более увлекательные разговоры и предоставлять более последовательный и персонализированный цифровой опыт в Интернете, обеспечивая последовательный и индивидуальный подход к каждому клиенту [8, 10].

Результатом работы является готовый чат-бот, который поможет пользователям самостоятельно определять предварительные диагнозы и осуществлять запись на прием к врачу.

Чат-боты, основанные на искусственном интеллекте, способны значительно ускорить и упростить процесс сбора анамнеза, экономя при этом рабочее время врачей и медсестёр.

Внедрение таких технологий в систему здравоохранения способствует повышению качества медицинской помощи [9, 11], снижению вероятности ошибок при постановке диагнозов

и разгрузке медперсонала, что позволит им сосредоточиться на изучении симптомов заболеваний и постановке более точных диагнозов.

Литература

1. Рейтинг мессенджеров 2022 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/10544793>
2. Официальный сайт Telegram [Электронный ресурс]: API – Режим доступа: <https://core.telegram.org/api>
3. Цифровизация внутрикорпоративных коммуникаций / И. А. Зубцов, П. В. Дерюгин, Д. Ю. Панарин [и др.] // Стратегия и тактика управления предприятием в переходной экономике: сборник материалов XX ежегодного открытого конкурса научно-исследовательских работ студентов и молодых ученых в области экономики и управления, Волгоград, 01–30 апреля 2020 года. Том Выпуск 40. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. – С. 42-44. – EDN BTVRCK.
4. Матвеева Н. Ю., Технологии создания и применения чат-ботов [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-sozdaniya-i-primeneniya-chat-botov>
5. Абрамов, Г. В. Проектирование информационных систем: Учебное пособие / Г. В. Абрамов, И. Е. Медведкова, Л. А. Коробова. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2012. – 172 с. – ISBN 978-5-89448-953-7. – EDN ZVCUUV.
6. Коробова, Л. А. Чат-бот как виртуальный помощник формирования заявок на обслуживание / Л. А. Коробова, Ю. И. Новикова // Инженерные технологии. – 2024. – № 2(6). – С. 45-53. – EDN RPRNSE.
7. Telegram Bot API [Электронный ресурс]: Telegram Documents. – Режим доступа: <https://core.telegram.org/bots/api>
8. Майка, А. Н. Исследование возможностей и преимуществ разработки программного обеспечения для интеллектуального анализа процессов в Российской Федерации / А. Н. Майка, Л. А. Коробова // Инженерные технологии. – 2024. – № 1(5). – С. 34-40. – EDN JRTKZS.
9. Матыцина, И. А. Информационная система диагностики легочных заболеваний при обследовании пациентов: монография / И. А. Матыцина, Л. А. Коробова, Г. В. Абрамов. – Воронеж: ООО рекламно-издательская фирма «Кварта», 2024. – 162 с. – ISBN 978-5-89609-786-0. – EDN IZVMNS.
10. Developing a learning system with gamification elements / L. Korobova, I. Tolstova, S. Chernyaeva [et al.] // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021) : Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. Vol. 2647 A. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 50012. – DOI 10.1063/5.0104273. – EDN GCDPXD.
11. Prototype mobile application definitions fresh products based on neural network / L. A. Korobova, I. S. Tolstova, I. A. Matytsina, M. S. Mironova // Journal of Physics: Conference Series : Current Problems, Voronezh, 07–09 декабря 2020 года. – Voronezh, 2021. – P. 012118. – DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012118. – EDN XIEBCT.

References

1. Rating of messengers 2022 [Electronic resource] Access mode: <https://tass.ru/ekonomika/10544793>
2. Official Telegram website [Electronic resource]: API – Access mode: <https://core.telegram.org/api>
3. Digitalization of internal corporate communications / I. A. Zubtsov, P. V. Deryugin, D. Yu. Panarin [etc.] // Strategy and tactics of enterprise management in a transition economy: collection of materials of the XX annual open competition of scientific research works of students and young people scientists in the field of economics and management, Volgograd, April 01–30, 2020. Volume Issue 40. – Volgograd: Volgograd State Technical University, 2020. – P. 42-44. – EDN BTVRCK.
4. Matveeva N. Yu., Technologies for creating and using chat bots [Electronic resource] Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/v/tehnologii-sozdaniya-i-primeneniya-chat-botov>
5. Abramov, G.V. Design of information systems: Textbook / G.V. Abramov, I.E. Medvedkova, L.A. Korobova. – Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2012. – 172 p. – ISBN 978-5-89448-953-7. – EDN ZVCUUV.

6. Korobova, L. A. Chat bot as a virtual assistant for generating service requests / L. A. Korobova, Yu. I. Novikova // *Engineering technologies*. – 2024. – No. 2(6). – P. 45-53. – EDN RPRNSE.
7. Telegram Bot API [Electronic resource]: Telegram Documents. – Access mode: <https://core.telegram.org/bots/api>
8. Maika, A. N. Study of the possibilities and advantages of software development for intelligent process analysis in the Russian Federation / A. N. Maika, L. A. Korobova // *Engineering technologies*. – 2024. – No. 1(5). – P. 34-40. – EDN JRTKZS.
9. Matytsina, I. A. Information system for diagnosing pulmonary diseases when examining patients: monograph / I. A. Matytsina, L. A. Korobova, G. V. Abramov. – Voronezh: LLC advertising and publishing company “Kvarta”, 2024. – 162 p. – ISBN 978-5-89609-786-0. – EDN IZVMNS.
10. Developing a learning system with gamification elements / L. Korobova, I. Tolstova, S. Chernyaeva [et al.] // *Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021): Conference Proceedings, Krasnoyarsk, October 28, 2021. Vol. 2647 A.* – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 50012. – DOI 10.1063/5.0104273. – EDN GCDPXD.
11. Prototype mobile application definitions fresh products based on neural network / L. A. Korobova, I. S. Tolstova, I. A. Matytsina, M. S. Mironova // *Journal of Physics: Conference Series: Current Problems, Voronezh, December 07–09, 2020.* – Voronezh, 2021. – P. 012118. – DOI 10.1088/1742-6596/1902/1/012118. – EDN XIЕВСТ.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
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 Scopus Author ID: 57202287474
Головин Андрей Ильич	аспирант 1-го года обучения, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", кафедры «Информационных технологий, моделирования и управления», agolovin2011@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)
Korobova Ludmila Anatolievna	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 Scopus Author ID: 57202287474
Golovin Andrey Ilyich	Voronezh State University of Engineering Technologies, Department of Information Technology, Modeling and Management, agolovin2011@gmail.com

статья поступила в редакцию 22.07.2024	одобрена после рецензирования 02.08.2024	принята к публикации 03.09.2024
the article was submitted 22.07.2024	approved after reviewing 02.08.2024	accepted for publication 03.09.2024

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ PDF РЕДАКТОРОВ

Юрий Юрьевич Токарев¹ yuritokarev0@gmail.com
Людмила Анатольевна Коробова¹ ✉ Lyudmila_korobova@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Удобные просмотр, редактирование, подпись и управление PDF документами важны пользователям в домашней и профессиональной сфере. Существует множество разнообразных PDF редакторов, которые в разной степени поддерживают возможность совершать разнообразные манипуляции. На разных платформах также могут быть проблемы с их использованием, поскольку не все редакторы поддерживают все возможные комбинации операционных систем и платформ. Многим пользователям нужен PDF редактор для просмотра, печати и подписывания разнообразных документов на различных платформах. Сложность покупки PDF редакторов и необходимость их использования в России стали предпосылками для проведения анализа существующих на рынке редакторов. В рамках анализа даны оценки их доступности и функционалу, что позволит пользователям совершать взвешенный и обоснованный выбор.

Ключевые слова: PDF редактор, заполнение форм, электронная подпись, кроссплатформенность, Javascript, оптическое распознавание символов.

Для цитирования: Токарев Ю. Ю., Коробова Л. А. Сравнение различных pdf редакторов // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 35-41.

Review article

COMPARISON OF VARIOUS PDF EDITORS

Yuri Yu. Tokarev¹ yuritokarev0@gmail.com
Lyudmila A. Korobova¹ ✉ Lyudmila_korobova@mail.ru

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

Abstract. Convenient viewing, editing, signing and managing PDF documents are important for users in the home and professional sphere. There are many different PDF editors that support the ability to perform various manipulations to varying degrees. There may also be problems with their use on different platforms, since not all editors support all possible combinations of operating systems and platforms. Many users need a PDF editor to view, print and sign various documents on different platforms. The complexity of purchasing PDF editors and the need to use them in Russia became the prerequisites for analyzing the editors existing on the market. The analysis provides assessments of their availability and functionality, which will allow users to make a balanced and informed choice.

Key words: PDF editor, form filling, electronic signature, cross-platform, Javascript, optical character recognition.

For citation: Tokarev Yu. Yu., Korobova L. A. Comparison of various pdf editors. Ingeneryne tehnologii = Engineering technologies. 2024; (3 (7)): 35-41. (In Russ.).

Введение

PDF – это Portable Document Format, который был разработан Adobe в 1992 г. [1]. Цель разработки такого формата файлов – возможность показывать и распечатывать документы с их форматированием и изображениями так, чтобы вне зависимости от приложения, оборудования и операционной системы файл отрисовывался одинаково. Каждый PDF файл содержит в себе полное описание того, как необходимо отобразить содержимое, что включает в себя текст, векторные рисунки, шрифты, картинки, формы и так далее [2]. Например, текстовые объекты содержат в себе указание на то, каким шрифтом их печатать, а также шири-

ну, на которую следует отступать после печати символа. Таким образом, программа, показывающая PDF файл, не делает никакого разбиения текста на абзацы и не пытается его отформатировать.

Золотым стандартом редакторов является Acrobat Pro, созданный компанией Adobe, разработавшей стандарт PDF. Однако Adobe принципиально не поддерживают Linux, и не сделали ни один из их продуктов кроссплатформенным [3]. Подобным образом, многие PDF редакторы избегают Linux как операционной системы и вместо этого в основном работоспособны только на Windows и Mac OS.

Таким образом, в рамках данной работы проведено сравнение популярных на текущий

момент PDF редакторов. Цель исследования - создать список редакторов, которыми могут воспользоваться компании для работы с PDF файлами в электронном формате.

Методология

Для сравнения редакторов используются 8 критериев оценки:

- кроссплатформенность;
- доступность в РФ;
- возможно ли, подписать и проверить цифровую подпись на корректность;
- какова поддержка комментирования файла PDF;
- каков уровень поддержки редактирования PDF файлов;
- создание и заполнение форм;
- поддержка Javascript;
- OCR (оптическое распознавание символов).

Первые два критерия наиболее важны по отношению с остальными. Для итогового вывода приоритет и значимость критериев «кроссплатформенность» и «доступность в РФ» удваиваются.

Диапазон значений по каждому критерию составляет 1 до 10.

1. Кроссплатформенность – существует множество операционных систем (ОС), которые используются в работе компаний. Для примера остановимся на следующих ОС.

А) Дистрибутивы Linux – поддерживает ли последняя версия программы установку и запуск в виде ELF файла хотя бы в одном из дистрибутивов?

Б) Windows – есть ли возможность установить программу на последнюю версию операционной системы?

В) Mac OS – существует ли версия программы под эту операционную систему?

Г) Astra Linux – есть ли отдельная поддержка отечественной операционной системы на основе Linux?

Также в сравнении кроссплатформенности учитывается, существуют ли отдельные версии под ARM, Mac OS, Linux и Windows?

Максимально возможная оценка – 7.

Оценка за каждую поддерживаемую систему: 1 - за платформу (Linux и Mac OS x64 и ARM), поддерживаемую редактором, 2 - за поддержку Astra Linux.

2. Возможно ли, подписать документ цифровой подписью и проверить саму подпись на корректность. Максимально возможная оценка – 10.

А) С помощью стандартных алгоритмов, установленных в операционной системе по умолчанию.

Б) С помощью криптографических алгоритмов ГОСТ [4].

Оценка: 5 за поддержку стандартных алгоритмов, 5 за поддержку алгоритмов ГОСТ, из 10.

3. Какова поддержка комментирования файла PDF? Максимально возможная оценка – 10

А) Заметки (Sticky note).

Б) Печатная машинка (Typewriter).

В) Сноска (Callout).

Г) Графические объекты-комментарии (прямоугольник, линия, и т.д.).

Оценка: 2.5 за поддержку каждой категории, из 10.

4. Каков уровень поддержки редактирования PDF файлов?

Создание и редактирование объектов на странице оценивается экспертом от 1 до 10 баллов в зависимости от того, насколько хорошо поддерживается редактором эта функция.

5. Создание и заполнение форм. Максимально возможная оценка – 10.

А) Возможно ли заполнять статические формы в документе?

Б) Возможно ли заполнять динамические XFA формы в документе?

В) Возможно ли создавать и редактировать свои статические формы?

Оценка: 4 за возможность создавать формы, 3 за возможность заполнять обычные формы, 3 за возможность заполнять XFA формы, из 10.

6. Поддержка Javascript. Максимально возможная оценка – 10.

А) Есть ли возможность использовать Javascript для расширения возможностей документа?

Б) Поддерживается ли весь стандарт Acrobat JavaScript API Reference?

Оценка: 5 за поддержку Javascript, 5 за поддержку Javascript API Reference, из 10.

7. Доступность в РФ. Максимально возможная оценка – 10.

А) Есть ли возможность купить лицензии без ограничений с поддержкой?

Б) Является ли цена приемлемой для конечного пользователя?

Оценка: 5 за возможность купить, и ещё от 0 до 5 за доступность для обычного пользователя, из 10.

8. OCR (Optical Character Recognition - оптическое распознавание символов). Данный

критерий оценивается по возможности использовать редактор для распознавания отсканированного текста?

Оценка присутствия: 0 – нет, 1 – имеет возможность распознавания.

Таким образом, математическая формализация определения суммарной оценки исследуемого редактора по каждому критерию имеет вид:

$$ИТОГ_j = \sum_{i=1}^n \frac{kr_i}{Mvo_j}, j = \overline{1...m},$$

где $ИТОГ_j$ – итоговая оценка по каждому критерию; kr_i – значение оценки параметра в каждом критерии; Mvo_j – максимально возможное значение j – го критерия; j – индекс номера критерия, $j = \overline{1...m}$, $m=8$; i – индекс параметра в каждом критерии, $i = \overline{1...n}$, n – индивидуально для каждого критерия.

Для обзора будут использоваться trial версии, а также информация в сети интернет [5 - 9]. Сравниваться будут следующие редакторы и просмотрщики с возможностью редактировать: Adobe Acrobat Pro, Master PDF Editor, Foxit PDF Editor, ContentAI ContentReader, Okular и PDF Studio.

Результаты исследования

Анализ Adobe Acrobat Pro. Это программа, которая была разработана для поддержки всех возможных манипуляций над PDF файлами [5]. У данной программы самое высокое качество работы в связи с тем, что эта компания разрабатывала сам формат PDF.

Процедура оценки:

1. Поддерживает следующие операционные системы: Windows 11(x64), Mac OS(Intel x64, ARM): оценка – 3/7 [5].

2. Может подписывать с помощью алгоритмов, указанных в стандарте PDF и не может подписывать документы с помощью GOST алгоритмов. Плагины для подписывания с помощью GOST существуют для версии 9, которая вышла в 2009: оценка – 4/10.

3. Будучи редактором созданного ими формата, позволяет создавать и редактировать все виды комментариев. 10/10.

4. Также как и выше, позволяет свободно редактировать и создавать объекты любых типов. 10/10.

5. Позволяет создавать свои собственные статические формы, заполнять их, а также заполнять XFA формы. 10/10.

6. Полностью реализует поддержку формата Javascript и Acrobat JavaScript API. 10/10.

7. Помимо проблем с оплатой, компания не пытается прекратить работу в России. Цена за Adobe Acrobat Professional за год подписки: 41 472 руб. 5/10 [1].

8. Да, возможно попробовать распознать любые документы. Качество считается хуже, чем у некоторых конкурентов.

Итого: $0.86 + 0.4 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = 7.26 / 10$

Вывод. Недоступность для обычных пользователей из-за цены и отсутствие поддержки Linux и Astra Linux делает Acrobat лучшим редактором в случаях, когда не нужно использовать эти системы в больших организациях и которые способны платить цену (п. 7) за каждый экземпляр.

Анализ Master PDF Editor. Это многофункциональный редактор PDF файлов, способный делать почти всё, что может делать Acrobat. Местами более неудобен интерфейс, а также хуже поддержка редактирования текста [6]. Разрабатывается компанией Code Industry, офис которой находится в России.

Процедура оценки.

1. Поддерживает все виды систем: Windows(x64), Linux(x64 и ARM), Astra Linux, Mac OS(x64, ARM) 7/7.

2. Может подписывать с помощью стандартных средств системы либо КриптоПро либо GOST Engine на Linux, либо КриптоПро для Mac OS 10/10.

3. Может создавать и редактировать все виды комментариев 10/10 .

4. Может редактировать все виды объектов, существующие в PDF, с редкими багами в редактировании, а также более ограниченным контролем за оформлением по сравнению с Adobe Acrobat Pro 7/10.

5. С помощью редактора можно заполнять и создавать свои собственные формы, с редкими багами при заполнении XFA форм 9/10.

6. Реализует поддержку Javascript, но не реализует полностью поддержку Acrobat Javascript API Reference 7/10.

7. Да, компания Code Industry расположена в России, можно легко купить без каких либо проблем. Цена: 2550 руб. для физических лиц 10/10 [6].

8. Позволяет распознавать документы с помощью Tesseract.

Итого: $2 + 1 + 1 + 0.7 + 0.9 + 0.7 + 2 + 1 = 9.3 / 10$

Вывод. Дешёвый, хорошо работающий в большинстве случаев, с поддержкой отечественных систем и разработок редактор PDF.

Анализ ContentAI ContentReader PDF - это основанный на ABBYY FineReader редактор, который реализует такой же уровень возможностей [7].

Процедура оценки.

1. Поддерживает Windows и Mac OS(x64) 2/7.

2. Поддерживает подписывание стандартными алгоритмами. Вероятнее всего не поддерживает подписывание алгоритмами GOST 5/10.

3. Позволяет редактировать и создавать любые комментарии 10/10.

4. Позволяет создавать и редактировать любые виды объектов. Редактирование текста содержит меньше возможностей для оформления чем Adobe Acrobat 9/10.

5. Может создавать и заполнять формы 10/10.

6. Поддерживает скрипты, которые написаны внутри PDF, но не позволяет создавать свои. Также полностью реализует Acrobat Javascript API 8/10.

7. Продаётся в России. Цена: 7 436 рублей за годовую лицензию 7/10.

8. Имеет собственную систему распознавания текста, которая работает лучше конкурентов на рынке.

Итого: $0.56 + 0.5 + 1 + 0.9 + 1 + 0.8 + 1.4 + 1 = 7.22 / 10$

Вывод. Очень качественный редактор, лучший OCR для текста на рынке, однако он не поддерживает Astra Linux и Linux, что лишает возможности его использования в государственных организациях или местах где необходима самая высокая безопасность операционной системы.

Анализ Foxit PDF Editor. Это PDF редактор, сделанный компанией Foxit Software, базирующейся в Китае. Считается одним из лучших редакторов PDF на рынке [8].

Процедура оценки.

1. Поддерживает x64 версии Linux и Mac OS. Версия просмотрщик также поддерживает Linux 2/7.

2. Поддерживает подписывание документов, но не поддерживает использование алгоритмов GOST для электронных подписей 5/10.

3. Позволяет создавать и изменять комментарии всех видов 10/10.

4. Также как и остальные редакторы реализует редактирование объектов PDF. Редактирование текста немного хуже чем Adobe Acrobat 9/10.

5. Позволяет создавать и заполнять все виды форм без недочётов 10/10.

6. Имеет поддержку Javascript, позволяет создавать и изменять его прямо в документе. Поддерживает функции указанные в Adobe Javascript API Reference 10/10.

7. На их сайте невозможно посетить страницу с покупками. Также не выходит найти реселлеров лицензии 0/10.

8. Имеет возможность использовать OCR.

Итого: $0.57 + 0.5 + 1 + 0.9 + 1 + 1 + 0 + 1 = 5.97 / 10$

Вывод. Несмотря на то, что этот редактор один из лучших, у организаций и клиентов желающих им воспользоваться могут быть трудности с покупкой. Также ими поддерживается довольно ограниченное количество систем и платформ стационарных ПК.

Анализ Okular. Это PDF просмотрщик с открытым исходным кодом, разработанный KDE обществом [9].

Процедура оценки.

1. Официально есть готовые версии под Windows, Linux и Mac OS. Поскольку исходный код в открытом доступе, можно собрать также для ARM версий систем. Из-за этого, вероятно, также будет работать на Astra Linux 7/7.

2. Есть версия Okular с поддержкой GOST алгоритм, сделанная российскими разработчиками специально для подписывания документов с помощью ЭЦП 10/10.

3. Имеет неполную поддержку комментариев. Можно создавать, редактировать и менять большинство видов комментариев, но некоторые отсутствуют 7.5/10.

4. Не имеет возможности менять объекты PDF на странице 0/10.

5. Позволяет заполнять формы, но нельзя их создавать 6/10.

6. Есть экспериментальная ограниченная поддержка Javascript и Adobe Javascript API 3/10.

7. Из-за открытого исходного кода можно с лёгкостью использовать. Однако поскольку приложение не имеет организации, которая по договорённости должна осуществлять поддержку, если будут проблемы, то не у кого будет попросить помощи 7/10.

8. В Okular отсутствует возможность использовать OCR для распознавания.

Итого: $2 + 1 + 0.75 + 0 + 0.6 + 0.3 + 1.4 + 0 = 6.05 / 10$

Вывод. В случаях, когда нужно лишь чтение, просмотр и подпись PDF файлов,

простой просмотрщик подойдёт лучше всего, но если необходимо редактирование, то придётся выбрать что-нибудь ещё.

Анализ PDF Studio. Это хороший PDF редактор, сделанный Qoppa Software. С таким же набором функционала как Adobe Acrobat [1], и поддержкой Linux и многих других операционных систем, является одним из немногих конкурентов Master PDF Editor.

Процедура оценки.

1. Поддерживает следующие операционные системы: Windows, Linux(x64), Mac OS(x64, ARM). Нет явной поддержки Astra Linux, но вероятно будет работать на менее защищённых версиях 5/7.

2. Поддерживает подписывание документов, не поддерживает использование GOST алгоритмов 5/10.

3. Позволяет создавать и редактировать все виды комментариев 10/10.

4. Есть возможность редактировать любые объекты PDF 10/10.

5. Может создавать формы. Также возможно заполнять статические и динамические формы 10/10.

6. Есть поддержка Javascript, но поддержка Acrobat Javascript API не полная 7/10.

7. Есть возможность купить лицензию через реселлеров. Цена – 99\$ что около 9900 руб. 7/10.

8. Есть возможность использовать OCR для распознавания текста.

Итого: $1.43 + 0.5 + 1 + 1 + 1 + 0.7 + 1.4 + 1 = 8.03 / 10$

Вывод. PDF Studio является полезным редактором для компаний, в которых используются Linux дистрибутивы, или в которых используются несколько разных видов операционных систем. В связи с этим PDF Studio, вероятно, будет одна из двух опций если работа на Linux является обязательной. В связи с тем, что компания является американской, высока вероятность, что будут проблемы с лицензией или с поддержкой.

Рейтинг редакторов в удобном для просмотра формате предоставлен в таблице 1.

Таблица 1. Рейтинг редакторов

Table 1. Editors' rating

Редактор / editor	Adobe Acrobat Pro	Master PDF Editor	ContentAI ContentReader	Foxit PDF Editor	Okular	PDF Studio
Кроссплатформенность / Cross-platform	0.86	2	0.56	0.57	2	1.43
Подписание / Signing	0.4	1	0.5	0.5	1	0.5
Комментирование / Commenting	1	1	1	1	0.75	1
Редактирование / Editing	1	0.7	0.9	0.9	0	1
Формы / Forms	1	1	1	1	0.6	1
Javascript	1	0.7	0.8	1	0.3	0.7
Доступность в РФ / Availability in the Russian Federation	1	2	1.4	0	1.4	1.4
OCR	1	1	1	1	0	1
Итого / Result	7.26	9.40	7.16	5.97	6.05	8.23

Выводы

На текущий момент в среде окружения Linux имеется очень ограниченное количество PDF редакторов, которые способны предоставить все способы обработки PDF файлов. Многие редакторы также не имеют возможности подписать документы с помощью российских электронных цифровых

подписей с использованием криптографических алгоритмов ГОСТ.

По итогу было определено, что лучшим PDF редактором для компаний, работающих на Linux, Astra Linux и Baikal систем является Master PDF Editor. Следующим в рейтинге определен редактор PDF Studio. Его рекомендуется использовать в ситуациях, когда не нужны повышенные режимы защищённости или Astra Linux в принципе.

Литература

1. Сайт компании Softline. Adobe Acrobat Professional в Воронеже [Электронный ресурс] – URL: <https://store.softline.ru/adobe/adobe-acrobat-pro> (дата обращения 30.09.2024).
2. Черняева, С. Н. Разработка вариантов схем планирования запуска экземпляров классов функциональных модулей / С. Н. Черняева, Л. А. Коробова, А. П. Антосина // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: Сборник научных статей и докладов VIII Международной научно-практической конференции, Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 2022. – С. 542-550. – EDN ABUWDG.
3. Черняева, С. Н. Анализ вариантов систем журналирования и диспетчеризации тиражируемых экземпляров функционалов / С. Н. Черняева, Л. А. Коробова, А. П. Антосина // Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник статей X национальной научно-практической конференции с международным участием, Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2022. – С. 358-365. – EDN LXQRXV.
4. Коробова, Л. А. Принцип работы децентрализованной информационной системы денежных переводов / Л. А. Коробова, С. С. Бондаренко, Д. П. Мухин // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. – Т. 84, № 3(93). – С. 337-344. – DOI 10.20914/2310-1202-2022-3-337-344. – EDN OIOYIZ.
5. Системные требования Adobe Acrobat Reader [Электронный ресурс] – URL: <https://helpx.adobe.com/acrobat/system-requirements.html> (дата обращения 30.09.2024).
6. Сайт компании Code Industry. Master PDF Editor [Электронный ресурс] – URL: <https://code-industry.ru/purchase-masterpdfeditor/> (дата обращения 30.09.2024).
7. Сайт компании Softonic. Программное обеспечение Foxit Advanced PDF Editor [Электронный ресурс] – URL: <https://foxit-advanced-pdf-editor.softonic.ru/> (дата обращения 30.09.2024).
8. Сайт компании Content AI. Отечественное ПО ContentReader [Электронный ресурс] – URL: <https://contentai.ru/contentreader-pdf/home> (дата обращения 30.09.2024).
9. Отечественное ПО Окуляр ГОСТ [Электронный ресурс] – URL: <https://okulargost.ru/> (дата обращения 30.09.2024).

References

1. The website of the Softline company. Adobe Acrobat Professional in Voronezh [Electronic resource] – URL: <https://store.softline.ru/adobe/adobe-acrobat-pro> (accessed 30.09.2024).
2. Chernyaeva, S. N. Development of variants of schemes for planning the launch of instances of classes of functional modules / S. N. Chernyaeva, L. A. Korobova, A. P. Antosina // Food security: scientific, personnel and information support: Collection of scientific articles and reports of the VIII International Scientific and Practical Conference, Voronezh: Voronezh State University University of Engineering Technologies", 2022. – pp. 542-550. – EDN ABUWDG.
3. Chernyaeva, S. N. Analysis of options for logging and dispatching systems of replicated copies of functions / S. N. Chernyaeva, L. A. Korobova, A. P. Antosina // Modeling of energy-informational processes: Collection of articles of the X national scientific and practical conference with international participation, Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2022. – pp. 358-365. – EDN LXQRXV.
4. Korobova, L. A. The principle of operation of a decentralized information system of money transfers / L. A. Korobova, S. S. Bondarenko, D. P. Mukhin // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. - 2022. – Vol. 84, No. 3(93). – pp. 337-344. – DOI 10.20914/2310-1202-2022-3-337-344. – EDN OIOYIZ.
5. System requirements Adobe Acrobat Reader [Electronic resource] – URL: <https://helpx.adobe.com/acrobat/system-requirements.html> (accessed 30.09.2024).
6. The website of the Code Industry company. Master PDF Editor [Electronic resource] – URL: <https://code-industry.ru/purchase-masterpdfeditor/> (accessed 30.09.2024).
7. Softonic's website. Foxit Advanced PDF Editor software [Electronic resource] – URL: <https://foxit-advanced-pdf-editor.softonic.ru/> (accessed 30.09.2024).
8. The website of the company Content AI. Domestic ContentReader software [Electronic resource] – URL: <https://contentai.ru/contentreader-pdf/home> (date of application 30.09.2024).
9. Domestic ACCORDING to the Eyepiece GOST [Electronic resource] – URL: <https://okulargost.ru/> (accessed 30.09.2024).

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Токарев Юрий Юрьевич	студент-магистр, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", кафедры «Информационных технологий, моделирования и управления», yuritokarev0@gmail.com
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 Scopus Author ID: 57202287474

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Tokarev Yuri Yurievich	Master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Department of Information Technology, Modeling and Management, yuritokarev0@gmail.com
Korobova Ludmila Anatolievna	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 Scopus Author ID: 57202287474

статья поступила в редакцию 05.09.2024	одобрена после рецензирования 16.09.2024	принята к публикации 27.09.2024
the article was submitted 05.09.2024	approved after reviewing 16.09.2024	accepted for publication 27.09.2024

Научная статья

УДК 621.793.79: 539.32

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
МЕТОДОВ НАПЫЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАЗМЫ**

Сергей Юрьевич Жачкин	1	zhach@list.ru
Григорий Игоревич Трифонов ✉	1	grishakip@yandex.ru
Арсений Павлович Котов	1	

¹Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, д. 54А, Воронеж, 394064, Россия

Аннотация. Работа посвящена изучению особенностей газотермического метода нанесения функциональных покрытий на поверхность деталей машин. В частности, рассматривается плазменное напыление композиционных покрытий. Исследование было разделено на теоретическую и экспериментальную части. В теоретической части были проанализированы математические зависимости, описывающие процесс распространения волн в многокомпонентных средах. Подробно были рассмотрены уравнения, описывающие скорости распространения продольных и поперечных волн. В экспериментальной части работы провели металлографический анализ полученного композитного покрытия, нанесённого с использованием технологии плазменного напыления. Были проведены оптическая и сканирующая микроскопии, проанализированы поперечный срез и микроструктура стальных образцов с композитным покрытием, рассмотрены микроструктура и результаты испытаний на царапины. Основываясь на результатах лабораторных исследований композитного покрытия из порошка никеля и частиц карбида титана, можно с уверенностью сказать, что в покрытии отсутствуют расслоения, дефекты, трещины и крупные поры. Мы пришли к выводу, что одним из интересных направлений для дальнейших исследований в области нанесения функциональных композиционных покрытий является математическое моделирование распространения поперечных волн в трёхкомпонентной среде. За этим последуют практические эксперименты с полученным материалом.

Ключевые слова: плазменное напыление, продольные волны, композитное покрытие, металлографический анализ, карбид титана, прочность сцепления покрытия с основой.

Для цитирования: Жачкин С. Ю., Трифонов Г. И., Котов А. П. Теоретические и металлографические исследования методов напыления функциональных покрытий с использованием плазмы // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 42-50.

Original article

**THEORETICAL AND METALLOGRAPHIC STUDIES BY SPRAYING FUNCTIONAL
COATINGS USING PLASMA**

Sergey Yu. Zhachkin	1	zhach@list.ru
Grigoriy I. Trifonov ✉	1	grishakip@yandex.ru
Arseniy P. Kotov	1	

¹Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54A, Starye Bolshevikov str., Voronezh, 394064, Russia

Abstract. The work is devoted to the study of the features of the gas-thermal method of applying functional coatings to the surface of machine parts. In particular, plasma spraying of composite coatings is considered. The study was divided into theoretical and experimental parts. In the theoretical part, mathematical dependencies describing the process of wave propagation in multicomponent media were predicted. The equations describing the propagation velocities of longitudinal and transverse waves were analyzed in detail. In the experimental part of the work, a metallographic analysis of the resulting composite coating applied using plasma spraying technology was performed. Optical and scanning microscopy were performed, the cross section and microstructure of steel samples with composite coating were analyzed, the microstructure and the results of scratch tests were considered. Based on the results of laboratory studies of a composite coating made of nickel powder and titanium carbide particles, it is safe to say that there are no delaminations, defects, cracks and large pores in the coating. We came to the conclusion that one of the interesting directions for further

research in the field of applying functional composite coatings is the mathematical modeling of transverse wave propagation in a three-component medium. This will be followed by practical experiments with the obtained material.

Keywords: plasma spraying, longitudinal waves, composite coating, metallographic analysis, titanium carbide, adhesion strength of the coating to the substrate.

For citation: Zhachkin S. Yu., Trifonov G. I., Kotov A. P. Theoretical and metallographic studies by spraying functional coatings using plasma. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 42-50. (In Russ.).

Введение

В настоящее время методы нанесения покрытий с использованием газотермических технологий, включая плазменное напыление, становятся все более востребованными на производственных площадках России в рамках программы импортозамещения. Эта технология является частью быстро развивающейся области обработки поверхностей. Она уже применяется на предприятиях по ремонту и реставрации, поскольку является мощным методом улучшения физических, механических и эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов за счет нанесения функциональных покрытий со специфическими свойствами [1].

Современные авиастроительные предприятия постоянно увеличивают требования к качеству наносимых покрытий, поэтому необходимо проводить научные исследования для разработки новых методов и технологий нанесения функциональных покрытий и улучшения существующих подходов. Как известно [2], рациональное использование технологических процессов с их возможной оптимизацией в зависимости от поставленных задач тесно связано с проведением всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, касающихся физических и химических процессов.

Анализ научных работ таких авторов, как В.И. Черноиванов [3], А.М. Кадырметов [4] и Л.И. Тушинский [5], позволяет сделать вывод, что наиболее экономически выгодным, а также теоретически и практически обоснованным методом увеличения срока службы изношенных деталей машин и их восстановления является использование технологии нанесения композитных покрытий методом плазменного напыления.

Итак, были определены цели этой работы:

1. Изучить и проанализировать существующие математические формулы, которые описывают распространение нестационарных волн при плазменном напылении.

2. Исследовать микроструктуру композитного покрытия, нанесённого в лабораторных условиях, с помощью металлографического анализа.

Теоретические исследования

Опубликована серия работ, в которых авторы проводят теоретические исследования и строят математические модели на основе распространения нестационарных волн в многокомпонентных средах [6-8]. Сейчас мы стремимся обобщить полученные результаты, чтобы создать комплексную математическую модель процесса плазменного напыления.

Такая модель, с соответствующим набором входных и выходных параметров будет полезна для анализа закономерностей формирования функциональных покрытий.

Обобщение полученных результатов по исследованию нестационарных волн в процессе плазменного напыления, а также рассмотрению особенностей математического моделирования его отдельных этапов является одной из целей данной работы.

С середины прошлого века учёные изучают, как возникают и распространяются продольные и поперечные волны в сложных средах. В частности, они обсуждают, как распространяются два типа продольных акустических волн в средах с «открытыми» порами. В работах М.А. Био [9-11] много внимания уделено описанию того, как два типа волн сжатия распространяются через среду, состоящую из твердого каркаса и жидкости. Авторы В. Н. Николаевский [12] и Л. Я. Косачевский [13] провели детальное исследование различных акустических характеристик Р-волн первого и второго рода, и эта тема продолжает развиваться другими специалистами в настоящее время.

В ходе исследования распространения нестационарных волн при плазменном напылении были сделаны следующие допущения: размеры пор в материале очень малы по сравнению с расстоянием, на котором существенно изменяются физико-механические свойства частиц напыляемого материала. Кроме того, математические модели распространения упругих волн в пористой среде могут быть описаны уравнениями фазы упруговязкопластической деформации, тензора упругой деформации и тензора скорости пластической деформации.

В работе [14] были получены уравнения, определяющие продольные и поперечные скорости нестационарных волн при контакте газовой и твердой фаз.

$$G_t^2 = \frac{1}{2(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)} \left(\left(\rho_{11}A_2 - 2\rho_{12}A_1 + \rho_{22} \frac{E(1-\nu_1)}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} \right) \pm \sqrt{D} \right), \quad (1)$$

$$A_1 = (1-m)R_0, \quad A_2 = mR_0, \quad (2)$$

где ρ_{11} и ρ_{22} – эффективные массы фаз; ρ_{12} – коэффициент динамической связи упруго-вязкопластической фазы и газа; E – модуль

Скорость распространения продольной волны находится

Юнга; ν_1 – коэффициент Пуассона; m – пористость; R_0 – модуль сжимаемости газа.

Скорость распространения поперечной волны находится:

$$G_t = \sqrt{\frac{E\rho_{22}}{2(1+\nu_1)(\rho_{11}\rho_{22} - \rho_{12}^2)}}. \quad (3)$$

В ходе исследования [12] было установлено, что разработка математической модели, основанной на распространении упругих волн в двухкомпонентной среде, позволит более детально изучить влияние скоростей продольных и поперечных волн на физико-механические и теплофизические характеристики материала,

включая модуль Юнга, коэффициент Пуассона, а также коэффициенты сжимаемости и плотности наносимого покрытия.

В работе [15] было получено уравнение, определяющее скорость поперечной волны, распространяющейся в трехкомпонентной среде:

$$a_t = \sqrt{\frac{(\gamma_{22}\gamma_{33} - \gamma_{23}^2)E}{2(1+\nu)M'(\gamma_{12}\gamma_{13}\gamma_{23} - \gamma_{13}^2\gamma_{22} - \gamma_{11}\gamma_{23}^2 + \gamma_{12}\gamma_{13}\gamma_{23} + \gamma_{11}\gamma_{22}\gamma_{33} - \gamma_{12}^2\gamma_{33})}}, \quad (4)$$

$$\sigma'_{11} = \frac{E}{2(1+\nu)M'}, \quad M' = \mu + 2(1-m)R_0^{(2)} + mR_0^{(2)} + 2(1-m)R_0^{(3)} + mR_0^{(3)}, \quad (5)$$

где γ_{ij} – величины, характеризующие скачки первых производных напряжений, сил, действующих на исследуемые фазы, а также на скорости перемещения компонент покрытия; μ – коэффициент Ламе; $R_0^{(2)}$, $R_0^{(3)}$ – коэффициенты сжимаемости компонент, заполненных жидкостью и газом.

Таким образом была получена математическая модель, описывающая процесс распространения продольной волны в трехкомпонентной среде.

Металлографические исследования

Для создания матричной основы композитного покрытия, сформированного при его плазменном напылении на стальные образцы, был выбран порошок марки ПГ-СР4 (ПР-НХ17СР4), который самофлюсуется и содержит никель, хром, бор и кремний.

На основе результатов научных исследований [16-19] и существующих химических, теплофизических, эксплуатационных критериев, совместимости материалов матрицы и наполнителя было установлено, что лучшим

выбором наполнителя для самофлюсующихся порошков, таких как ПР-НХ17СР4, являются карбиды металлов.

Основываясь на результатах исследований [20, 21], которые были посвящены процессам нанесения и формирования композиционных материалов на поверхности деталей машин, мы решили использовать карбид титана в качестве наполнителя.

При совместном использовании карбида титана и самофлюсующегося порошка, где элементы выступают в роли матрицы композитного покрытия, происходит смачивание поверхности гранул карбида титана, что способствует созданию износостойкого покрытия с высокой пластичностью.

Как показали результаты испытаний на износостойкость покрытий [22] значительное влияние оказывает строение структуры покрытия.

Структура композитного покрытия, изготовленного из этих материалов [23], показана на рисунке 1.

Нерасплавившиеся частицы TiC



а)

б)

Рисунок 1. Структура композитного покрытия
а) – оптическая микроскопия; б) растровая электронная микроскопия

Figure 1. The structure of the composite coating
a) – optical microscopy; b) scanning electron microscopy

Полученное функциональное покрытие обладает твёрдостью 66 HRC. Оно состоит из никелевой основы, в которую равномерно распределены мелкие частицы карбида титана. Эти частицы прочно связаны с никелевой основой. Когда такое покрытие трется о твердый абразив, никелевая основа укрепляется за счет перемещения и взаимодействия с карбидом титана. Это подтверждается увеличением твердости покрытия после трения по сравнению с его первоначальным состоянием.

Металлографические исследования образцов с обычным покрытием, полученным путём напыления порошкового материала марки ПГ-СР4, показали, что твердость материала снижается от внешнего края к центру образца.

По мере износа верхнего слоя покрытия обнажается менее упрочненный слой, что приводит к резкому увеличению интенсивности износа.

Образцы с покрытием из композитного материала продемонстрировали гораздо меньший износ благодаря равномерной твёрдости нанесённого слоя по всей его глубине. Поэтому даже при износе верхних слоёв твёрдость покрытия почти не менялась, что обеспечило стабильность интенсивности износа.

На рисунке 2 показаны полученные микрошлифы композитного покрытия, полученные в ходе металлографического исследования.

На рисунке 3 показано поперечное сечение покрытия, нанесенного на поверхность.

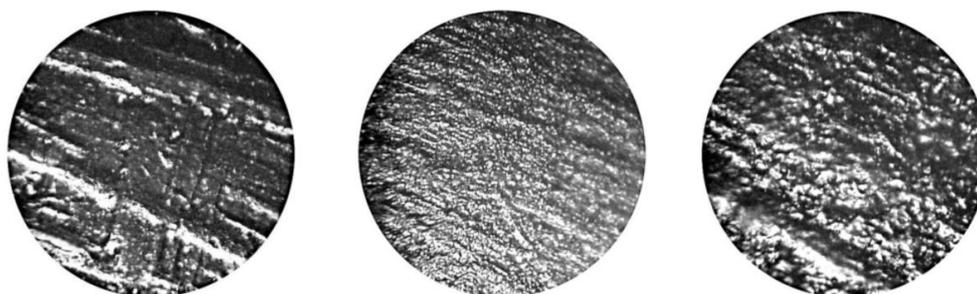


Рисунок 2. Микрошлифы композитного покрытия

Figure 2. Microslips of the composite coating

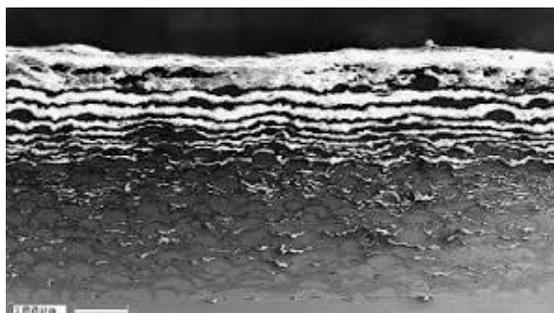


Рисунок 3. Поперечный шлиф покрытия

Figure 3. Cross section of the coating

На рисунке 3 отчётливо видна слоистая структура покрытия, которая образовалась в результате его нанесения. В ходе исследования ни на одном из образцов не наблюдалось отслоения покрытия от подложки. Также не было обнаружено таких дефектов, как трещины, отслоения или крупные поры. Напротив, микрошлифы (см. рисунок 2) характеризуются высокой плотностью, равномерной структурой, от-

сутствием трещин и прочным сцеплением покрытия с основой.

Особое внимание при исследовании покрытия было уделено его прочности сцепления с основой (со стальным образцом). Так, была исследована микроструктура композитного покрытия, представленная на рисунке 4.

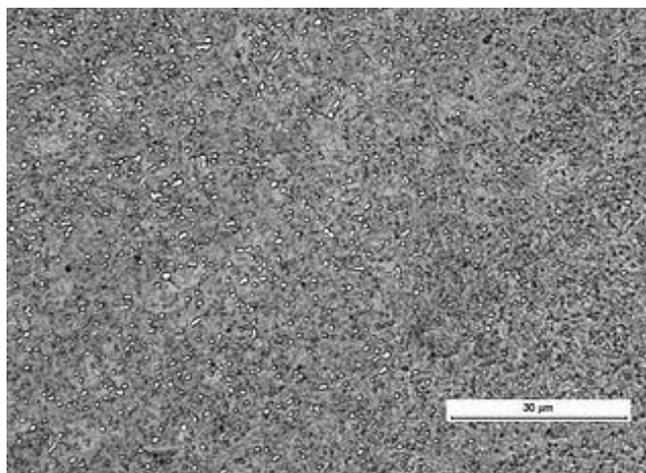


Рисунок 4. Микроструктура покрытия

Figure 4. Microstructure of the coating

Используя метод скрэтч-тестирования, было проведено исследование адгезионной прочности, которое показало, что её величина составляет 380 МПа, что является весьма вы-

соким показателем качества полученного композитного покрытия.

В таблице 1 показаны царапины на поверхностях покрытий исследуемых образцов при одинаковой нагрузке.

Таблица 1. Вид образцов при проведении скрэтч-тестов

Table 1. Type of samples during scratch tests

№ образца	Тип покрытия	Нагрузка, Н	Внешний вид покрытия
1	ПГ-СР 4	34	
2	ПГ-СР4+18%TiC		
3	ПГ-СР4+23,5%TiC		
4	ПГ-СР4+30%TiC		

Стандартное покрытие, полученное при напылении порошка марки ПГ-СР4, демонстрирует наибольшее когезионное разрушение. Это сопровождается увеличением акустической эмиссии при нагрузке. Покрытия ПГ-СР4+30%TiC, ПГ-СР4+18%TiC и ПГ-СР4+23,5%TiC, обладающие повышенной когезионной прочностью, показывают минимальное разрушение. Разрушение покрытий 1, 2 и 4 когезионного типа было вызвано расстрескиванием, возникающим в плоскости, перпендикулярной направлению роста покрытия от края, что приводило к образованию внутренних трещин внутри царапины. Покрытие 3 не показало трещин во время испытаний.

Выводы

В ходе теоретического исследования были получены важные результаты о распространении нестационарных волн в процессе плазменного напыления и нанесения покры-

тия. Одним из перспективных направлений для дальнейшего изучения этой темы является математическое моделирование распространения поперечных волн в трёхкомпонентной среде, особенно при формировании композитного покрытия на поверхности обрабатываемой детали.

В процессе металлографического исследования были выполнены оптическая и растровая микроскопия (рисунок 1), проанализированы микрошлифы и поперечный срез композитного покрытия (рисунки 2 и 3). Также изучалась микроструктура покрытия (рисунок 4) и проводились скрэтч-тесты (таблица 1).

По результатам экспериментальных и лабораторных исследований композитного покрытия, которые описаны в работах [24, 25], был сделан вывод: в материале покрытия не обнаружено отслоений, дефектов, трещин и крупных пор.

Литература

1. Девойно О.Г. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, А.С. Калиниченко [и др.]. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2020. – 280 с.
2. Кукарских Л.А. Моделирование волновых процессов в пористой среде / Л.А. Кукарских, М.А. Артемов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9, № 2. – С. 123-127.
3. Черноиванов В.И. Состояние и перспективы развития технического сервиса машин в АПК / В.И. Черноиванов // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109, № 1. – С. 4-8.
4. Кадырметов А.М. Исследование многокомпонентных сплавов, созданных атмосферным плазменным напылением / А.М. Кадырметов, Д.А. Попов, Е.В. Снятков // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов: сборник научных статей Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А.А. Байкова, Курск, 18 сентября 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 78-82.
5. Тушинский Л.И. Материаловедение в нанотрибологии / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, Н.С. Мочалина [и др.] // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2010. № 2(39). – С. 145-156.
6. Поленов В.С. Распространение волн в насыщенной жидкостью неоднородной пористой среде / В.С. Поленов, А.В. Чигарев // Прикладная математика и механика. 2010. Т. 74, № 2. – С. 276-284.
7. Propagation of weak waves in the inhomogeneous elastoviscoplastic medium with a cell structure / A. Bubulis, A.V. Chigarev, V.T. Minchenya, V.S. Polenov // Journal of Vibroengineering. 2012. Vol. 14, No. 2. pp. 783-793.
8. Поленов В.С. Распространение упругих волн в насыщенной вязкой жидкостью пористой среде / В.С. Поленов // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78, № 4. – С. 501-507.
9. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range. J. Acoust. Soc. America. 1956. Vol. 28. № 2. pp. 168-178.
10. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher Frequency Range. J. Acoust. Soc. America. 1956. Vol. 28. № 2. pp. 179-191.
11. Biot M.A. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. Journal of Applied Physic. 1962. Vol. 33. № 4. pp. 1483-1498.
12. Nikolaevskij V.N. Mechanics of porous and fractured media. Singapore. World Scientific. 1990.
13. Косачевский Л.Я. О распространении упругих волн в двухкомпонентных средах. ПММ. 1959, 23. № 6. С. 1115-1123.

14. Кукарских Л.А. Распространение волн в двухкомпонентных средах: специальность 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Кукарских Любовь Алексеевна. – Воронеж, 2013. – 16 с.
15. Трифонов Г.И. Математическое моделирование процессов плазменного напыления покрытий трехкомпонентных сред / Г.И. Трифонов, В.С. Поленов, С.Ю. Жачкин // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 10. – С. 131-136.
16. Composite mesoporous vaterite-magnetite coatings on polycaprolactone fibrous matrix / N.V. Koronevskiy, M.S. Savelyeva, M.V. Lomova [et al.] // *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics*. 2022. Vol. 22, No. 1. pp. 62-71.
17. Таран В.М. Разработка экспертно-статистического метода численного моделирования прочности и пористости композитных покрытий / В.М. Таран, О.А. Маркелова, И.П. Гришина // *Конструкции из композиционных материалов*. 2020. № 2(158). – С. 21-27.
18. Structural Features of the Refractory Powder Materials Based on Titanium Carbide Obtained by SHS-Grinding / Z.T. Turganov, A. M. Stolin, P.M. Bazhin, O.A. Averichev // *Advanced Materials and Technologies*. 2020. No. 2(18). pp. 3-9.
19. Князева А.Г. Взаимовлияние диффузии и напряжений в переходной зоне между частицей и матрицей при синтезе композита / А.Г. Князева, М.А. Анисимова // *Химическая физика и мезоскопия*. 2022. Т. 24, № 4. – С. 421-435.
20. Ташметов М.Ю. Влияние металлоида на структуры упорядочения карбида титана / М.Ю. Ташметов, В.Т. Эм, Б.Н. Савенко // *Физика твердого тела*. 1997. Т. 39, № 12. – С. 2207-2209.
21. Иванов С.Г. Формирование диффузионного покрытия на титане из смеси на основе карбида бора / С.Г. Иванов, М.А. Гурьев, Т.Г. Иванова, Е.А. Кошелева // *Ползуновский альманах*. 2015. № 2. – С. 165-168.
22. Трифонов Г.И. Исследование износостойкости дисперсно-наполненного композитного покрытия, нанесенного плазменным методом напыления / Г.И. Трифонов // *Быстрозакаленные материалы и покрытия: Материалы XIX Международной научно-технической конференции, Москва, 18-19 октября 2022 года*. Москва: Издательство Пробел-2000, 2022. – С. 153-156.
23. Патент № 2797988 С1 Российская Федерация, МПК С22С 32/00, С23С 4/10. порошкообразный материал для плазменного напыления композитных покрытий: № 2022108222: заявл. 28.03.2022 г.: опубл. 13.06.2023 г. / Г.И. Трифонов, С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».
24. Трифонов Г.И. Восстановление рабочих поверхностей шнека транспортирующих устройств плазменным напылением износостойкого композитного покрытия: специальность 05.20.03 «Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Трифонов Григорий Игоревич, 2022. – 166 с.
25. Трифонов Г.И. Металломатричное композитное покрытие для восстановления и упрочнения поверхностей деталей плазменным напылением / Г.И. Трифонов // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2023. Т. 19, № 5(221). – С. 225-230.

References

1. Devoino O.G. Technology of forming wear-resistant coatings on an iron base by laser processing methods / O.G. Devoino, M.A. Kardapolova, A.S. Kalinichenko [et al.]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2020. – 280 p.
2. Kukarskikh L.A. Modeling of wave processes in a porous medium / L.A. Kukarskikh, M.A. Artyomov // *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2013. Vol. 9, No. 2. pp. 123-127.
3. Chernoiyanov V.I. The state and prospects of development of technical service of machines in the agro-industrial complex / V.I. Chernoiyanov // *Proceedings of GOSNITI*. 2012. Vol. 109, No. 1. pp. 4-8.
4. Kadyrmetov A.M. Research of multicomponent alloys created by atmospheric plasma spraying / A.M. Kadyrmetov, D.A. Popov, E.V. Snyatkov // *Modern problems and directions of development of metallurgy and heat treatment of metals and alloys: collection of scientific articles of the International scientific and technical conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician A.A. Baykov, Kursk, September 18, 2020*. – Kursk: Southwestern State University, 2020. pp. 78-82.

5. Tushinsky L.I. Materials science in nanotribology / L.I. Tushinsky, A.V. Plokhov, N.S. Mochalina [et al.] // Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. 2010. No. 2(39). pp. 145-156.
6. Polenov V.S. Wave propagation in an inhomogeneous porous medium saturated with a liquid / V.S. Polenov, A.V. Chigarev // Applied Mathematics and Mechanics. 2010. Vol. 74, No. 2. pp. 276-284.
7. Propagation of weak waves in the inhomogeneous elastoviscoplastic medium with a cell structure / A. Bubulis, A.V. Chigarev, V.T. Minchenya, V.S. Polenov // Journal of Vibroengineering. 2012. Vol. 14, No. 2. pp. 783-793.
8. Polenov V.S. Propagation of elastic waves in a porous medium saturated with a viscous liquid / V.S. Polenov // Applied Mathematics and Mechanics. 2014. Vol. 78, No. 4. pp. 501-507.
9. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid I. Low-Frequency Range. J. Acoust. Soc. America. 1956. Vol. 28. № 2. pp. 168-178.
10. Biot M.A. Theory propagation of elastic waves in a fluid- saturated porous solid. II. Higher Frequency Range. J. Acoust. Soc. America. 1956. Vol. 28. № 2. pp. 179-191.
11. Biot M.A. Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media. Journal of Applied Physic. 1962. Vol. 33. № 4. pp. 1483-1498.
12. Nikolaevskij V.N. Mechanics of porous and fractured media. Singapore. World Scientific.1990.
13. Kosachevsky L.Ya. On the propagation of elastic waves in two-component media. PMM. 1959, 23. No. 6. pp. 1115-1123.
14. Kukarskikh L.A. Wave propagation in two-component media: specialty 02/01/04 «Mechanics of a deformable solid»: abstract of the dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences / Kukarskikh Lyubov Alekseevna. – Voronezh, 2013. – 16 p.
15. Trifonov G.I. Mathematical modeling of plasma spraying processes of coatings of three-component media / G.I. Trifonov, V.S. Polenov, S.Yu. Zhachkin // Modern high-tech technologies. 2018. No. 10. – pp. 131-136.
16. Composite mesoporous vaterite-magnetite coatings on polycaprolactone fibrous matrix / N.V. Koronevskiy, M.S. Savelyeva, M.V. Lomova [et al.] // Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Physics. 2022. Vol. 22, No. 1. pp. 62-71.
17. Taran V.M. Development of an expert statistical method for numerical modeling of strength and porosity of composite coatings / V.M. Taran, O.A. Markelova, I.P. Grishina // Constructions from composite materials. 2020. No. 2(158). pp. 21-27.
18. Structural Features of the Refractory Powder Materials Based on Titanium Carbide Obtained by SHS-Grinding / Z.T. Turganov, A. M. Stolin, P.M. Bazhin, O.A. Averichev // Advanced Materials and Technologies. 2020. No. 2(18). pp. 3-9.
19. Knyazeva A.G. Interrelation of diffusion and tension in the transition zone between particles and matrices in composite synthesis. G. Knyazeva, M.A. Anisimova // Chemical Physics and mesoscopy. 2022. T. 24, № 4. pp. 421-435.
20. Tashmetov M.Yu. The influence of metalloid on the ordering structures of titanium carbide / M.Yu. Tashmetov, V.T. Im, B.N. Savchenko // Solid state Physics. 1997. Vol. 39, No. 12. pp. 2207-2209.
21. Ivanov S.G. Formation of a diffusion coating on titanium from a mixture based on boron carbide / S.G. Ivanov, M.A. Guryev, T.G. Ivanova, E.A. Kosheleva // Polzunovsky almanac. 2015. No. 2. pp. 165-168.
22. Trifonov G.I. Investigation of the wear resistance of a dispersed-filled composite coating applied by plasma spraying method / G.I. Trifonov // Quick-hardened materials and coatings: Materials of the XIX International Scientific and Technical Conference, Moscow, October 18-19, 2022. Moscow: Space Publishing House-2000, 2022. pp. 153-156.
23. Patent № 2797988 C1 Russian Federation, IPC C22C 32/00, C23C 4/10. Powdered material for plasma spraying of composite coatings: No. 2022108222: application 28.03.2022: publ. 13.06.2023 / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov; Applicant Federal State State Military Educational Institution of Higher Education «Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin».
24. Trifonov G.I. Restoration of the working surfaces of the screw of transporting devices by plasma spraying of a wear-resistant composite coating: specialty 05.20.03 «Technologies and maintenance tools in agriculture»: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Trifonov Grigory Igorevich, 2022. – 166 p.
25. Trifonov G.I. Metal matrix composite coating for restoration and hardening of surfaces of parts by plasma spraying / G.I. Trifonov // Hardening technologies and coatings. 2023. Vol. 19, No. 5(221). pp. 225-230.

Сведения об авторах

ФИО	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Жачкин Сергей Юрьевич	доктор технических наук, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», zhach@list.ru SPIN-код: 9374-2996 ORCID 0000-0002-1844-5011 Researcher ID: AAC-7580-2022 Scopus ID: 57210973083
Трифонов Григорий Игоревич	кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», grishakip@yandex.ru SPIN-код: 9499-2510 ORCID 0000-0002-7739-5587 AuthorID: 928344
Котов Арсений Павлович	курсант, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Authors information

Last name, first name, patronymic	<i>Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)</i>
Zhachkin Sergey Yurievich	DSc, professor, Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», zhach@list.ru SPIN-code: 9374-2996 ORCID 0000-0002-1844-5011 Researcher ID: AAC-7580-2022 Scopus ID: 57210973083
Trifonov Grigoriy Igorovich	PhD, senior researcher at the research center, Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», grishakip@yandex.ru SPIN-code: 9499-2510 ORCID 0000-0002-7739-5587 AuthorID: 928344
Kotov Arseniy Pavlovich	the cadet, Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»

статья поступила в редакцию
31.07.2024

одобрена после рецензирования
26.08.2024

принята к публикации
09.09.2024

the article was submitted
31.07.2024

approved after reviewing
26.08.2024

accepted for publication
09.09.2024

ВЛИЯНИЕ ФОСФОРНОГО ШЛАКА, ЖИДКОГО СТЕКЛА И ГРУНТА НА СОСТОЯНИЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Игорь Александрович Викулин	1	ivikulin@inbox.ru
Алексей Алексеевич Скрыпников	1	aleksei-skrypnikov@inbox.ru
Андрей Сергеевич Сергеев	2	pnipu_sk@mail.ru
Юрий Алексеевич Боровлев	3	borovlevury@mail.ru
Дмитрий Петрович Шульгин	1	skrypnikovvsafe@mail.ru
Алексей Витальевич Самойленко	1	skrypnikovvsafe@mail.ru

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

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия

³Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, пр-т Академика Лаврентьева, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия

Аннотация. В статье проводится исследование взаимодействия между фосфорным шлаком, жидким стеклом и почвой в контексте создания земляного полотна для лесовозных автомобильных дорог. Проанализированы эффекты внедрения фосфорного шлака и жидкого стекла в грунт с целью оптимизации его свойств и улучшения эксплуатационных характеристик. Исследование включает лабораторные испытания, направленные на оценку влияния этих добавок на механические и физико-химические свойства грунта. Особое внимание уделено повышению прочности, устойчивости к воздействию влаги и другим параметрам, влияющим на долговечность и надежность дорожных покрытий в лесной промышленности. Полученные результаты предлагают новый подход к использованию фосфорного шлака и жидкого стекла в инженерных решениях для укрепления и совершенствования грунтовых дорожных покрытий. Кроме того, в статье подробно рассматривается влияние состава жидкого стекла и дозировки шлака на прочностные характеристики укрепленного грунта. В ходе лабораторных испытаний были изучены различные формулы жидкого стекла и количества шлака, а также их воздействие на механические свойства стабилизированного грунта. Результаты экспериментов указывают на значительное улучшение прочности грунта при определенных комбинациях жидкого стекла и шлака. Исследование также показало, что прочностные характеристики укрепленного грунта зависят от множества факторов, включая плотность грунта, уровень его влажности, исходные свойства почвы и концентрацию используемых добавок. Полученные данные могут быть полезны для разработки эффективных технологий строительства и реконструкции лесовозных автомобильных дорог, направленных на повышение их устойчивости и снижение экологического воздействия. Кроме того, это позволяет оптимизировать процесс укрепления грунта и повысить его прочностные показатели за счет использования жидкого стекла и фосфорного шлака.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги; грунтовое полотно.

Для цитирования: Викулин И. А., Скрыпников А. А., Сергеев А. С., Боровлев Ю. А., Шульгин Д. П., Самойленко А. В. Влияние фосфорного шлака, жидкого стекла и грунта на состояние земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 51-64.

Research article

THE INTERACTION OF PHOSPHORIC SLAG, LIQUID GLASS AND SOIL IN THE ROADBED OF LOGGING ROADS

Igor A. Vikulin	1	ivikulin@inbox.ru
Alexey A. Skrypnikov	1	aleksei-skrypnikov@inbox.ru
Andrey S. Sergeev	2	pnipu_sk@mail.ru
Yuri A. Borovlev	3	borovlevury@mail.ru
Dmitry P. Shulgin	1	skrypnikovvsafe@mail.ru
Alexey V. Samoilenko	1	skrypnikovvsafe@mail.ru

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

²Perm National Research Polytechnic University Russian Federation, Komsomolsky pr., 29, Perm, Russia

³Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of SB RAS, 3 Akademika Lavrentieva Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia

Abstract. This article examines the interaction between phosphorus slag, liquid glass and soil in the context of logging road subgrades. The work analyzes the effects of adding phosphorus slag and liquid glass to the soil layer in order to

optimize its properties. The study includes laboratory tests that evaluate the effect of additives on the mechanical and physicochemical properties of the soil. Particular attention is paid to improving strength, resistance to moisture and other parameters that affect the durability and reliability of timber road surfaces. The study results provide new insight into the use of phosphorus slag and liquid glass in engineering solutions for strengthening and improving road surfaces. In addition, this article examines the effect of the composition of liquid glass and the dosage of slag on the strength of reinforced soil. Laboratory tests were carried out, during which various compositions of liquid glass and slag dosages were studied, as well as their effect on the mechanical properties of the reinforced soil. The results of the study indicate a significant improvement in soil strength with certain combinations of liquid glass and slag. The study also revealed that the strength of the reinforced soil depends on many factors, including soil density, moisture level, initial soil properties and the concentration of additives used. The data obtained can be useful for the development of effective technologies for the construction and reconstruction of logging roads in order to increase their stability and reduce environmental impact, as well as to optimize the process of strengthening the soil and increase its strength characteristics through the use of liquid glass and slag.

Key words: logging roads; unpaved road surface.

For citation: Vikulin I. A., Skrypnikov A. A., Sergeev A. S., Borovlev Yu. A., Shulgin D. P., Samoylenko A.V. The interaction of phosphoric slag, liquid glass and soil in the roadbed of logging roads. *Ingenerynye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 51-64. (In Russ.).

Введение

Выбор оптимального метода исследования является ключевым фактором для достижения точных и надёжных результатов в процессе совершенствования проектирования и организации строительства. Учитывая сложность и многогранность этих задач, возникает необходимость в использовании продвинутых математических инструментов и аналитических методов. Поэтому в данной статье представлен подробный обзор математических подходов, применённых при решении задач, связанных с организацией строительства лесных автомобильных дорог.

В частности, рассматриваются методы математического моделирования, оптимизации и алгоритмического анализа, которые позволяют эффективно планировать и управлять ресурсами в условиях сложной географии и ограничений, характерных для лесных районов. Также обсуждаются способы интеграции этих методов в практику проектирования, что способствует повышению эффективности и экономичности строительных процессов.

Дополнительно анализируются современные тенденции в применении математических методов в строительной отрасли, включая использование программного обеспечения для симуляции и прогнозирования. Это позволяет не только улучшить качество проектных решений, но и сократить время и затраты на реализацию проектов. Особое внимание уделяется адаптации математических моделей к специфическим условиям строительства лесных автодорог, где необходимо учитывать факторы окружающей среды, доступность материалов и техники, а также соблюдение экологических норм.

Постановка задачи

Математические методы, применяемые при решении задач организации строительства, можно разделить на две основные категории: детерминированные и стохастические. Детерминированные методы включают в себя аналитические расчёты параметров объекта и аналитическое моделирование, которые основаны на точных исходных данных и предполагают предсказуемое поведение системы. Они позволяют определить оптимальные параметры строительства при известных условиях и ограничениях.

С другой стороны, стохастические методы охватывают аналитические расчёты параметров объекта в условиях неопределённости и методы имитационного моделирования. Эти подходы учитывают случайные факторы и вариации, неизбежные в реальных проектах, такие как колебания цен на материалы, погодные условия или риски задержек. Имитационное моделирование позволяет воспроизводить и анализировать различные сценарии развития событий, что помогает в принятии более обоснованных решений.

Использование как детерминированных, так и стохастических методов обеспечивает комплексный подход к планированию и управлению строительными проектами. Выбор конкретного метода зависит от специфики задачи, доступности данных и степени неопределённости факторов, влияющих на проект. Таким образом, сочетание этих методов способствует повышению эффективности организации строительства и минимизации возможных рисков.

Методика

Наши исследования опирались на методику, предложенную В. Е. Соколовичем, которую мы несколько модифицировали, главным образом в части подготовки образцов. Изменения были внесены для более точного соответствия условиям нашего исследования.

По методике В. Е. Соколовича, подготовка образцов осуществляется следующим образом. Готовится глинисто-силикатный раствор путём смешения глинистого раствора жидкого стекла с раствором алюмината натрия. Полученная смесь заливается в стальные стаканчики, внутренние поверхности которых покрыты слоем парафина для предотвращения прилипания. После затвердевания раствора образцы извлекаются из стаканчиков и подвергаются испытаниям [1].

Этот метод оправдан и точно воспроизводит реальные условия твердения глинисто-силикатных растворов при закреплении грунтов методом инъектирования раствора непосредственно в грунт. Однако в контексте строительства дорожных покрытий из уплотнённого грунта, где происходит уплотнение слоёв, такая методика не позволяет корректно моделировать процессы, происходящие в уплотнённом слое. Поэтому она не могла быть принята в наших лабораторных исследованиях, направленных на изучение свойств уплотнённых грунтов при условиях уплотнения.

В связи с этим мы внесли изменения в процедуру приготовления образцов, адаптировав методику для более точного отражения условий уплотнения слоёв в дорожном строительстве. Наша модифицированная методика позволяет лучше моделировать реальные процессы, происходящие в уплотнённом грунте при его уплотнении, что обеспечивает более достоверные результаты при последующих испытаниях. Это, в свою очередь, способствует получению более точных данных о физико-механических свойствах материала, необходимых для оптимизации технологии строительства и повышения долговечности дорожных покрытий.

Решение задачи

В основу исследований была положена методика, разработанная В. Е. Соколовичем, которую мы несколько модифицировали для соответствия целям нашего эксперимента. Внесённые изменения касались главным образом процесса приготовления образцов.

Согласно оригинальной методике В. Е. Соколовича, образцы готовятся следую-

щим образом. Из глинистого раствора жидкого стекла и раствора алюмината натрия создаётся глинисто-силикатный раствор. Этот раствор заливается в стальные стаканчики, внутренние поверхности которых предварительно покрыты слоем парафина для предотвращения прилипания. После затвердевания раствора образцы извлекаются из форм и подвергаются необходимым испытаниям [1].

Такой подход оправдан при моделировании реальных условий твердения глинисто-силикатных растворов при закреплении грунтов методом инъектирования, где раствор вводится непосредственно в грунт. Однако в контексте строительства дорожных покрытий из уплотнённого грунта, где существенную роль играет уплотнение слоёв, данная методика не отражает процессов, происходящих в уплотнённом материале. Поэтому для наших лабораторных исследований, направленных на изучение именно этих процессов, потребовалась адаптация методики приготовления образцов.

Во всех наших экспериментах соотношение жидкого стекла к шлаку составляло 0,32. Приготовленную смесь укладывали в формы в два слоя, используя штыкование для уплотнения каждого слоя. Затем формы с образцами подвергали 30-кратному встряхиванию на лабораторном встряхивающем столе, что способствовало равномерному распределению компонентов и удалению воздушных пузырьков. После этого формы помещали в камеру, заполненную водой, где они выдерживались в течение 20 часов. По истечении этого времени образцы извлекали из форм и перемещали во влажные условия – в эксикатор над водой – на сроки 7 и 28 суток, обеспечивая оптимальные условия для процессов твердения.

После завершения указанных периодов выдержки образцы подвергались испытаниям на прочность при изгибе с использованием аппарата Кюля. Затем каждый образец разрезали на кубики размером 1×1×1 см для проведения испытаний на сжатие. Внутренние части образцов измельчали и анализировали с помощью термического и радиографического исследований. Для интерпретации результатов использовались специализированные литературные источники по термографии и рентгенографии.

Подготовка образцов осуществлялась следующим образом. Из грунта и грунтошлаковой смеси, затворённых жидким стеклом, изготавливали силикатогрунтовые и шлакосиликатогрунтовые образцы цилиндрической формы с диаметром и высотой по 5 см. Формование проводилось под нагрузкой 100 кг/см² в течение

3 минут, что обеспечивало необходимую степень уплотнения материала. Затем образцы помещали во влажные условия хранения — над водой в эксикаторе — на различные сроки: 7, 14, 28, 90 и 360 дней, чтобы исследовать динамику изменения их свойств со временем.

После определённых периодов выдержки некоторые образцы извлекали из десикаторов и помещали в стеклянные стаканы, заливая дистиллированной водой в соотношении объёмов 1:5 (образец к воде). В течение определённого времени воду периодически заменяли и анализировали на содержание оксида натрия (Na_2O) и диоксида кремния (SiO_2). По изменениям концентраций этих компонентов в воде и их исходному содержанию в образцах оценивали количество Na_2O и SiO_2 , вымытых из материала и поглощённых грунтом и шлакогрунтовой смесью. Это позволяло определить степень растворения и миграции активных компонентов.

Часть образцов подвергалась дополнительным термическим и рентгенографическим исследованиям для изучения их микроструктуры и фазового состава. Эти методы помогали выявить особенности кристаллизации, степень гидратации и образование новых фаз в процессе твердения.

Подготовка и испытание образцов грунта, укрепленного шлакосиликатными вяжущими, проводились в основном по методикам, применяемым для цементно-шлаковых смесей. Такой подход обеспечивал сопоставимость результатов и использование проверенных экспериментальных техник.

Грунт предварительно измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 5 мм для удаления крупных включений и получения однородной фракции. В воздушно-сухом состоянии грунт смешивали с молотым гранулированным шлаком, тщательно перемешивая для равномерного распределения компонентов. Полученную смесь затворяли жидким стеклом и вновь перемешивали до образования однородной шлакосиликатогрунтовой массы.

Из этой массы методом прессования в жёстких металлических формах с двусторонними вкладышами изготавливали цилиндрические образцы диаметром и высотой по 5 см, а также балочки размером 4×4×16 см. Прессование осуществлялось на гидравлическом прессе ПСУ-50 под нагрузкой 100 кг/см² в течение 3 минут, что обеспечивало необходимую плотность и структурную целостность образцов. Хранение образцов проводилось во влажных условиях — в ваннах с гидравличе-

ским затвором, поддерживающих постоянную влажность и предотвращающих испарение воды из материала.

Испытания балочек на изгиб выполнялись на испытательной машине МИИ-100, позволяющей точно измерить прочностные характеристики при изгибающих нагрузках. Половинки балочек, полученные после испытаний на изгиб, подвергались испытаниям на сжатие на механическом прессе, что давало информацию о прочности материала при сжимающих нагрузках.

Результаты проведённых исследований свидетельствуют о том, что при взаимодействии воды с фосфорным шлаком и фосфорсодержащими стёклами происходит постепенная гидратация этих материалов. Как показано на рисунке 1, увеличение времени контакта фосфорного шлака и фосфорсодержащих стёкол с дистиллированной водой приводит к повышению концентрации оксида кальция (CaO) в жидкой фазе. Однако максимальное содержание CaO в растворе не превышает 112 мг/л, а диоксида кремния (SiO_2) — 90 мг/л после трёхчасового взаимодействия фосфорсодержащего стекла № 1 с водой.

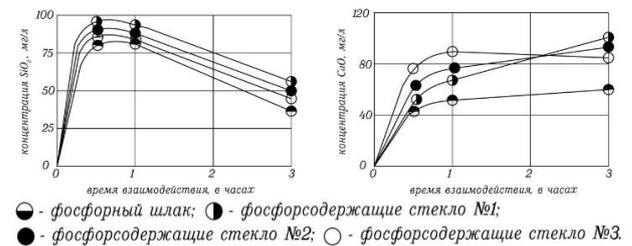


Рисунок 1. Изменение концентрации SiO_2 и CaO в жидкой фазе при гидратации шлака и фосфорсодержащих стекла (под действием воды)

Figure 1. Change in the concentration of SiO_2 and CaO in the liquid phase during hydration of slag and phosphorus-containing glasses (under the action of water)

Для сравнения, при трёхчасовой гидратации основного клинкерного минерала — трёхкальциевого силиката ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) — концентрация CaO в жидкой фазе достигает примерно 1500 мг/л, что в 13,4 раза выше, чем в случае с фосфорным шлаком и фосфорсодержащими стёклами [2–4]. Это указывает на более медленное протекание процессов гидратации в фосфорсодержащих материалах по сравнению с традиционными цементными компонентами.

Данные результаты важны для понимания особенностей поведения фосфорного шлака и фосфорсодержащих стёкол в строи-

тельных материалах. Низкая скорость гидратации может влиять на сроки набора прочности и другие эксплуатационные характеристики материалов на их основе. Понимание этих процессов позволяет оптимизировать условия применения таких материалов в строительстве, особенно при создании укрепленных грунтовых слоёв в дорожном строительстве.

Таким образом, модифицированная методика приготовления и испытания образцов, адаптированная под условия уплотнения слоёв в дорожных конструкциях, позволила более точно моделировать реальные процессы, происходящие в укрепленном грунте. Полученные данные способствуют развитию эффективных технологий использования шлакосиликатных вяжущих в строительстве и повышению долговечности и надёжности сооружений.

Недостаточная гидратация фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол свидетель-

ствует о низкой гидравлической активности соединений с добавками пятиоксида фосфора. Из рисунка 1 видно, что повышение содержания пятиоксида фосфора в стеклах уменьшает их гидратацию. Самая низкая гидратация наблюдается у молотого гранулированного фосфорного шлака. При взаимодействии жидкого стекла и фосфорного шлака переход к $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в жидкую фазу значительно снижается из-за низкой растворимости $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в щелочной среде. Например, в чистой воде при 200°C растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ составляет 1,19-1,21 г/л (зависит от размеров кристаллов), а в щелочной среде при концентрации NaOH в 6,141 г/л – 0,196 г/л. При более высокой концентрации щелочи (более 20 г/л) содержание CaO в растворе минимально (только "следы"). [5-7] Растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в дистиллированной воде и щелочах при различных температурах представлена в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в дистиллированной воде при различных температурах

Table 1. Solubility of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in distilled water at various temperatures

Температура, град. / Temperature, deg.	Концентрация CaO , г/л / concentration, g/l	Температура, град. / Temperature, deg.	Концентрация CaO , г/л / concentration, g/l	Температура, град. / Temperature, deg.	Концентрация CaO , г/л / concentration, g/l
0	1,30	50	0,917	150	0,247
15	1,22	90	0,523	190	0,084
25	1,13	120	0,400	250	0,037
40	1,00	125	0,308	-	-

На рисунке 2 представлены типичные кривые изменения содержания оксида кальция (CaO) в жидкой фазе при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла № 3 с жидким стеклом. В частности, при контакте фосфорного шлака с раствором жидкого стекла плотностью $1,0036 \text{ г/см}^3$ в течение трёх часов было обнаружено содержание CaO , равное 81 мг/л. Однако при использовании более концентрированного раствора жидкого стекла с плотностью $1,16 \text{ г/см}^3$ содержание оксида кальция в жидкой фазе снизилось до 15 мг/л. Аналогично, при взаимодействии фосфорсодержащего стекла № 3 с жидким стеклом той же плотности ($1,16 \text{ г/см}^3$) содержание CaO в жидкой фазе составило около 8 мг/л.

Эти наблюдения свидетельствуют о том, что увеличение плотности (концентрации) жидкого стекла приводит к снижению растворимости оксида кальция в системе. Это может быть связано с тем, что более концентрированный раствор жидкого стекла обладает повышенной щелочностью, что способствует уменьшению растворения CaO из фосфорного шлака и фос-

форсодержащего стекла. Таким образом, концентрация CaO в жидкой фазе уменьшается с увеличением плотности жидкого стекла.

Дополнительно, в таблице 2 представлены данные о растворимости гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в растворах гидроксида натрия (NaOH) при различных температурах. Эти данные важны для понимания процессов, происходящих в системе, поскольку растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ влияет на концентрацию ионов кальция в жидкой фазе. Из таблицы можно увидеть, как температура и концентрация NaOH влияют на способность $\text{Ca}(\text{OH})_2$ растворяться в растворе. Например, при повышении температуры растворимость $\text{Ca}(\text{OH})_2$ может увеличиваться, что, в свою очередь, влияет на химические реакции в системе и на процессы твердения шлакосиликатного вяжущего.

Сопоставление данных из рисунка 2 и таблицы 2 позволяет сделать вывод о комплексном влиянии концентрации жидкого стекла и температуры на растворимость компонентов системы. Понимание этих зависимостей важно для оптимизации процесса

укрепления грунтов. Например, выбор оптимальной плотности жидкого стекла может позволить контролировать концентрацию CaO в жидкой фазе, что влияет на скорость и эффективность процессов твердения и, следовательно, на конечные физико-механические свойства укрепленного грунта.

Кроме того, учитывая влияние температуры на растворимость Ca(OH)₂ в растворах NaOH, можно регулировать условия твердения шлакосиликатогрунтовых смесей для достижения желаемых свойств материала. Это особенно актуально при строительстве в различных климатических условиях, где температура

окружающей среды может существенно влиять на протекающие в материале процессы.

Таким образом, представленные данные подчеркивают важность контроля параметров системы при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащих стёкол с жидким стеклом. Оптимизация этих параметров позволяет улучшить процессы твердения шлакосиликатного вяжущего и получить укрепленные грунты с заданными прочностными характеристиками, что имеет большое значение для строительной отрасли и повышения надёжности возводимых сооружений.

Таблица 2. Данные о растворимости гидроксида кальция (Ca(OH)₂) в растворах гидроксида натрия (NaOH) при различных температурах

Table 2. Data on the solubility of calcium hydroxide (Ca(OH)₂) in solutions of sodium hydroxide (NaOH) at various temperatures

Температура, град. / Temperature, deg.	Концентрация / Concentration		Температура, град. / Temperature, deg.	Концентрация / Concentration	
	NaOH, г/л / g/l	CaO, г/л / g/l		NaOH, г/л / g/l	CaO, г/л / g/l
20	1,008	0,779	70	5,00	0,040
20	2,100	0,516	70	8,00	0,010
20	4,140	0,281	70	20,00	следы
20	6,141	0,196	100	0,40	0,350
20	8,361	0,146	100	1,60	0,140
70	0,400	0,530	100	5,00	0,010
70	1,600	0,250	100	8,00	следы

В жидкой фазе суспензий фосфорного шлака и стекла с добавками P₂O₅, содержащих жидкое стекло плотности 1,26 г/см³, обнаруживается присутствие извести в виде "следов".

Из рисунков 2 и 3 видно, что скорость перехода в CaO в раствор неравномерная: в первые часы она наибольшая, а в дальнейшем медленно увеличивается. Тормозящее действие на скорость гидратации оказывает образованная на поверхности частиц шлака или фосфорсодержащих стекол нерастворимая в среде жидкого стекла или воды пленка, возникающая в результате взаимодействия исходного продукта и реагента. Со временем эта пленка увеличивается в размерах и уплотняется, что затрудняет проникновение воды или жидкого стекла внутрь частиц доменного шлака или фосфорсодержащего стекла. Взаимодействие с жидким стеклом указанной пленки на частицах доменного шлака и глиноземсодержащих стекол ранее было отмечено рядом отечественных и зарубежных ученых. Для таких самотормозящих процессов скорость перехода CaO в жидкую фазу зависит от концентрации жидко-

го стекла, времени взаимодействия и температуры [8-9].

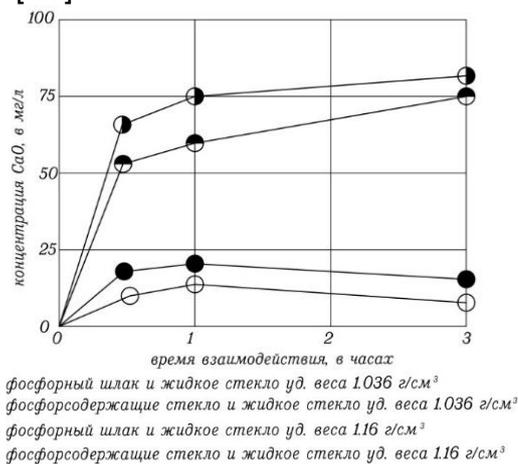


Рисунок 2. Изменение концентрации CaO в жидкой фазе при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла №3 с жидким стеклом

Figure 2. The change in the concentration of CaO in the liquid phase during the interaction of phosphorus slag and phosphorus-containing glass No. 3 with liquid glass

Ротинян А. Л. и Дроздовы Б. Г. предложили наиболее подходящее уравнение для самотормозящих реакций, охватывающее все факторы [10]

$$V = \frac{1}{t} \lg \frac{a}{a-x} - \beta \frac{x}{t} \quad (1)$$

где: a – начальная концентрация вещества; x – концентрация вещества, прореагировавшего ко времени t от начала опыта; β – коэффициент торможения реакции; V – суммарная скорость реакции.

Применение этого уравнения к процессам самоторможения, происходящим при взаимодействии фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол с жидким стеклом низкой плотности ($1,036 \text{ г/см}^3$), было подтверждено экспериментально. Расчёты показали линейную зависимость, что отражено на рисунке 3, где по оси ординат отложено значение $\frac{1}{t} \lg \frac{a}{a-x}$, а по оси абсцисс – $\frac{x}{t}$.

Данное уравнение позволяет более точно описать кинетику самотормозящих реакций, учитывая не только начальные концентрации реагентов, но и влияние продуктов реакции на её скорость. Коэффициент β отражает степень замедления реакции из-за накопления продуктов, которые могут ингибировать дальнейшее протекание процесса.

В контексте взаимодействия фосфорного шлака и фосфорсодержащих стекол с жидким стеклом, это уравнение помогает понять, как изменяется скорость реакции со временем и какие факторы на неё влияют. Например, при использовании жидкого стекла низкой плотности наблюдается определённая динамика изменения концентрации CaO в жидкой фазе, что связано с особенностями растворимости и реакции компонентов системы.

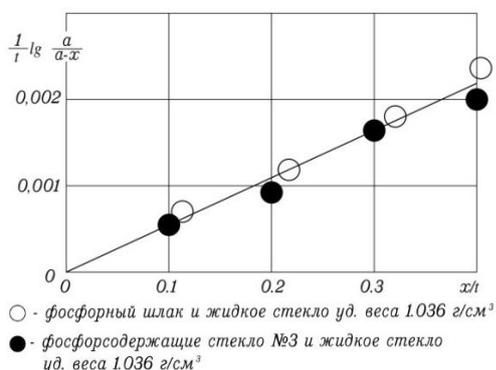


Рисунок 3. Применимость уравнения Ротиняна А.Л. и Дроздова Б. В. к взаимодействию исследуемых продуктов

Figure 3. Applicability of the Rotinyan A. L. and Drozdov B. V. equations to the interaction of the studied products

Как показали наши предыдущие исследования, при введении шлакосиликатного вяжущего в грунт происходит частичное поглощение жидкого стекла грунтовыми частицами. Это поглощение нарушает оптимальное соотношение компонентов вяжущего, что приводит к замедлению процессов его твердения. Поскольку различные грунты обладают разной способностью к поглощению жидкого стекла, каждый тип грунта требует индивидуального подбора оптимального состава шлакосиликатного вяжущего для обеспечения эффективного твердения. Эти выводы подтверждаются результатами наших экспериментов.

Данные, представленные на рисунке 4, демонстрируют, что для каждого конкретного типа грунта максимальная прочность укрепленного материала достигается при определенном удельном весе жидкого стекла. Наблюдается закономерность: чем больше в грунте содержится тонкодисперсных частиц, тем медленнее происходит набор прочности. В таких случаях максимальное значение прочности достигается при использовании жидкого стекла с более высокой плотностью.

Это явление объясняется тем, что мелкие частицы грунта обладают большей удельной поверхностью и, следовательно, более высокой способностью поглощать компоненты жидкого стекла. В результате активная концентрация вяжущего в системе снижается, что замедляет процессы гидратации и твердения. Поэтому для грунтов с высоким содержанием тонкодисперсных фракций необходимо увеличивать плотность жидкого стекла, чтобы компенсировать поглощение и поддерживать оптимальные условия для твердения.

Таким образом, при разработке и применении шлакосиликатного вяжущего важно учитывать гранулометрический состав грунта и его адсорбционные свойства. Индивидуальный подбор состава вяжущего для каждого типа грунта позволяет обеспечить оптимальные условия твердения и достичь максимальных прочностных характеристик укрепленного грунта. Это особенно актуально при строительстве на грунтах с высоким содержанием глинистых и пылеватых частиц, где стандартные составы вяжущего могут быть неэффективны.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что эффективное укрепление грунтов шлакосиликатным вяжущим требует комплексного подхода, включающего анализ свойств грунта и корректировку состава вяжущего. Такой подход обеспечивает надёжность и долговечность строительных

конструкций, возводимых на различных типах грунтов, и способствует оптимизации технологических процессов в строительстве.

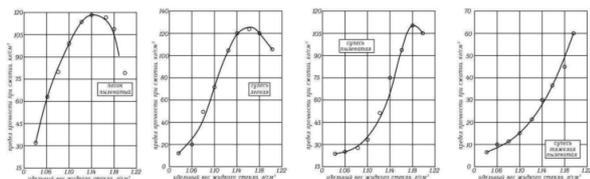


Рисунок 4. Зависимость предела прочности при сжатии от удельного веса жидкого стекла и типа грунта

Figure 4. Dependence of the compressive strength on the specific gravity of liquid glass and the type of soil

Анализ полученных данных показал, что зависимость прочности укрепленного грунта от удельного веса жидкого стекла имеет характерную трёхфазную форму, как представлено на рисунке 5. При низких значениях удельного веса жидкого стекла, а следовательно, при низком содержании в нём оксида натрия (Na_2O) и диоксида кремния (SiO_2), значительная часть этих компонентов поглощается тонкодисперсными частицами грунта. Это поглощение препятствует участию активных компонентов в реакциях со шлаком, что приводит к замедленному процессу твердения вяжущего и медленному увеличению прочности укрепленного грунта.

Первый участок кривой зависимости прочности при сжатии $R_{сж}=f(\text{уд. вес})R_{сж}=f(\text{уд. вес})$ характеризуется плавным, постепенным ростом прочности. Причём, чем больше в грунте содержится пылевато-глинистых частиц, тем более протяжённым становится этот участок кривой. Это связано с увеличенной поглотительной способностью таких грунтов, которые активно адсорбируют компоненты жидкого стекла.

С увеличением удельного веса жидкого стекла и, соответственно, повышением содержания Na_2O и SiO_2 , происходит насыщение грунта этими компонентами. В результате уменьшается степень их поглощения грунтом, и они начинают активно участвовать в реакциях со шлаком. Это способствует нормализации процесса твердения вяжущего и приводит к существенному увеличению прочности укрепленного грунта. На этом этапе наблюдается второй участок кривой, где рост прочности становится более интенсивным.

Дальнейшее увеличение удельного веса жидкого стекла приводит к пересыщению грунта его компонентами. Избыточное количество

жидкого стекла негативно влияет на процесс твердения и структуру образующегося материала. Это проявляется в замедлении роста прочности, а после достижения определённого предела — в её снижении. Третий участок кривой отражает эту тенденцию: повышение прочности сначала замедляется, а затем начинает уменьшаться.

Важно отметить, что чем выше поглотительная способность грунта, тем более выраженным становится эффект пересыщения при высоких значениях удельного веса жидкого стекла. Грунты с большой долей тонкодисперсных частиц способны поглощать больше компонентов жидкого стекла, что при избытке приводит к ухудшению физико-механических свойств укрепленного грунта.

Таким образом, для достижения оптимальных прочностных характеристик необходимо тщательно подбирать удельный вес жидкого стекла в зависимости от типа грунта. Оптимизация этого параметра позволяет обеспечить эффективное твердение шлакосиликатного вяжущего и предотвратить негативные эффекты, связанные с недостатком или избытком компонентов жидкого стекла. Это имеет особое значение при строительстве на грунтах с высокой поглотительной способностью, где стандартные составы вяжущего могут быть неэффективными без соответствующей корректировки.

Кроме того, понимание этой зависимости помогает в разработке более эффективных технологий укрепления грунтов, учитывающих индивидуальные свойства каждого типа грунта. Это способствует повышению надёжности и долговечности строительных конструкций, а также оптимизации затрат на материалы и процессы строительства.

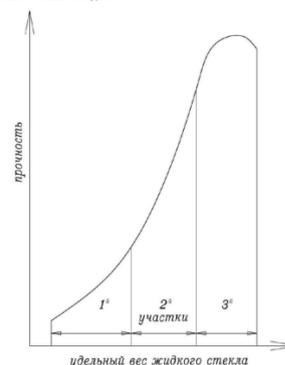


Рисунок 5. Влияние удельного веса жидкого стекла на прочность грунта укрепленного шлакосиликатным вяжущим

Figure 5. The effect of the specific gravity of liquid glass on the strength of the soil reinforced with a slag silicate binder

Математические выражения изменения прочности на сжатие ($R_{сж}$, кг/см²) водонасыщенных образцов в зависимости от удельного веса жидкого стекла (Δ , г/см³) при кремнеземистом модуле жидкого стекла 1,75 и 20 процентах шлаков в смеси, для различных грунтов имеют следующий вид:

а) для пылеватого песка

$$R_{сж} = 10^3 (-84,44\Delta^2 + 192,38\Delta - 108,4) \quad \text{при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,20. \quad (2)$$

Оптимальная величина удельного веса жидкого стекла ($\Delta_{опт.}$), при котором достигается максимальная прочность укрепленного грунта, определяется путем взятия первой производной исходного уравнения и приравнивания ее к нулю:

$$\frac{dR_{сж}}{d\Delta} = -2 * 84,44\Delta + 192,38 = 0 \quad (3)$$

Отсюда $\Delta_{опт.} \approx 1,14$ г/см³

б) для легкой супеси

$$R_{сж} = \begin{cases} e^{22,62\Delta - 31,43} & \text{при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,09 \\ 10^3 (-12,59\Delta^2 + 29,27\Delta - 16,88) & \text{при } 1,09 \leq \Delta \leq 1,20 \end{cases} \quad (4)$$

Оптимальная величина удельного веса жидкого стекла равна 1,16 г/см³

в)

$$R_{сж} = \begin{cases} e^{20,82\Delta - 19,75} & \text{при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,155 \\ 10^3 (-23,75\Delta^2 + 56,33\Delta - 33,3) & \text{при } 1,155 \leq \Delta \leq 1,20 \end{cases} \quad (5)$$

Оптимальная величина удельного веса жидкого стекла равна 1,19 г/см³

г) для тяжелой пылеватой супеси

$$R_{сж} = e^{13,02\Delta - 11,5} \quad \text{при } 1,04 \leq \Delta \leq 1,20 \quad (6)$$

Как видно из последнего уравнения, зависимость $R_{сж} = f(\Delta)$ для тяжелой пылеватой супеси представлена экспоненциальной зависимостью. Это свидетельствует о том, что для данного типа грунта при величине удельного веса жидкого стекла 1,20 г/см³, очевидно, не наступает еще пересыщение шлакосиликатного вяжущего жидким стеклом и не наблюдается точка перелома, что обуславливается большой поглотительной способностью данного грунта.

Математические выражения зависимости прочности от удельного веса жидкого стекла для различных типов грунтов еще раз подтверждают влияние типа грунта на выбор состава шлакосиликатного вяжущего. Так, при укреплении пылеватого песка шлакосиликатным вяжущим оптимальный удельный вес жидкого стекла равняется 1,14 г/см³, а при укреплении пылеватой супеси — 1,19 г/см³. Математические выражения зависимости прочности от удельного веса жидкого стекла могут быть использованы при проектировании составов укрепленных грунтов. Расчеты, проведенные по этим зависимостям, показывают высокую сходимость между расчетными и экспериментальными данными. Корреляционные

отношения, характеризующие тесноту связи между расчетными и экспериментальными данными, рассчитанные по формуле:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sum(R_{i\phi} - R_{ip})^2}{\sum(R_{ip} - R_{i\phi})^2}} \quad (7)$$

Для всех выведенных зависимостей колеблется в пределах от 0,92 до 0,99, а средний процент отклонений расчетных данных от экспериментальных, рассчитанный по формуле

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{R_{\phi} - R_p}{R_{\phi}} \quad (8)$$

составляет 1,5-5%.

Результаты исследований влияния кремнеземистого модуля жидкого стекла на прочность грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим, представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 видно, что оптимальным кремнеземистым модулем жидкого стекла при укреплении грунтов шлакосиликатным вяжущим на основе фосфорных гранулированных шлаков является модуль, равный 1,75.

Поскольку шлакосиликатное вяжущее содержит два компонента - шлак и жидкое стекло, то оба эти компонента оказывают влияние на прочность укрепленного грунта. Исследование влияния дозировки шлака проводилось на различных типах грунта с использованием жидкого стекла кремнеземистого модуля 1,75 и удельного веса 1,20 г/см³. Результаты исследований представлены на рисунке 6.

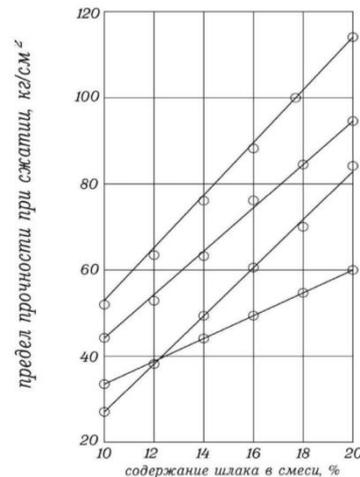


Рисунок 6. Зависимость между пределом прочности при сжатии грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим и содержанием шлака в смеси. 1 — пылеватый песок; 2 — супесь легкая; 3 — супесь пылеватая; 4 — супесь тяжелая

Figure 6. The relationship between the compressive strength of soils reinforced with a slag silicate binder and the slag content in the mixture. 1 — powdery sand; 2 — light sandy loam; 3 — powdery sandy loam; 4 — heavy sandy loam

Как показывает рисунок 6, с увеличением дозировки шлака прочность на сжатие укрепленного грунта непрерывно увеличивается. При этом чем меньше пылеватых глинистых частиц в грунте, тем значительно будет рост прочности с увеличением дозировки шлака.

Данные о влиянии содержания шлака на прочность укрепленного грунта показывают, что изменение содержания шлака позволяет изменить прочностные характеристики грунта.

Таблица 3. Влияние кремнеземистого модуля жидкого стекла на прочность шлакосиликатогрунта

Table 3. Effect of the silica module of liquid glass on the strength of the slag silicate soil

Наименование грунта / Name of the soil	Количество шлака в смеси, % по весу / The amount of slag in the mixture, % by weight	Показатели жидкого стекла / Liquid glass indicators		Предел прочности образцов при сжатии после 28 суток влажного твердения, кг/см ² / Compressive strength of samples after 28 days of wet hardening, kg/cm ²	
		удельный вес / specific gravity	кремнеземистый модуль / silica module	неводонасыщенные / non - water saturated	водонасыщенные / water saturated
Супесь пылеватая / Sandy loam is dusty	20	1,15	1,50	88	75
	20	1,15	1,75	81	77
	20	1,15	2,00	82	66
	20	1,15	2,25	55	44
	20	1,15	2,50	34	20
Супесь легкая крупная / The sandy loam is light and large	30	1,20	1,50	86	74
	30	1,20	1,75	135	146
	30	1,20	2,00	77	75
	20	1,15	1,50	47	40
	20	1,15	1,75	82	74
	20	1,15	2,00	48	41

Во всех случаях, рассматриваемых в рамках наших исследований, была обнаружена прямая пропорциональная зависимость между прочностью на сжатие укрепленного грунта и содержанием шлака в смеси (до 3%). Эта зависимость для различных типов грунтов может быть математически описана следующими уравнениями:

- а) Для пылеватого песка при $10\% \leq \text{Ш} \leq 20\%$: $R_{сж} = 5,2 \cdot \text{Ш} - 22$; $R_{сж} = 5,2 \cdot \text{Ш} - 22$;
 - б) Для лёгкой супеси при $10\% \leq \text{Ш} \leq 20\%$: $R_{сж} = 5,7 \cdot \text{Ш} - 3$; $R_{сж} = 5,7 \cdot \text{Ш} - 3$;
 - в) Для пылевой супеси при $10\% \leq \text{Ш} \leq 20\%$: $R_{сж} = 4,6 \cdot \text{Ш}$; $R_{сж} = 4,6 \cdot \text{Ш}$;
 - г) Для тяжёлой пылевой супеси при $10\% \leq \text{Ш} \leq 20\%$: $R_{сж} = 2,4 \cdot \text{Ш} + 11$; $R_{сж} = 2,4 \cdot \text{Ш} + 11$;
- где $R_{сж}$ — прочность на сжатие в кг/см², а Ш — содержание шлака в смеси в процентах.

Эти уравнения позволяют расчётным путём определить необходимую прочность для каждого конкретного типа укрепленного грунта. Однако практический опыт применения шлаков в укреплении грунтов показывает, что содержание шлака в смеси должно со-

ставлять не менее 20 %. Такое количество активного компонента (шлака вместе с активатором) в составе смеси обеспечивает эффективное обволакивание частиц грунта, что способствует значительному повышению прочности материала.

Кроме того, высокое содержание шлака в диапазоне от 15 % до 25 % способствует достижению высокой однородности смеси. Однородность является важным фактором, влияющим на стабильность и долговечность укрепленного грунта, особенно в условиях эксплуатации под нагрузкой.

Таким образом, при проектировании составов укрепленных грунтов необходимо учитывать не только математические зависимости прочности от содержания шлака, но и практические рекомендации по минимальному содержанию шлака в смеси. Это позволяет обеспечить оптимальные физико-механические свойства грунта, повысить его устойчивость к внешним воздействиям и продлить срок службы сооружений, возводимых на таком основании.

Важно также учитывать, что увеличение содержания шлака сверх определённого предела может не приводить к пропорциональному росту прочности, а в некоторых случаях может быть экономически нецелесообразным. Поэтому оптимизация состава укрепленного грунта должна основываться на комплексном анализе как технических, так и экономических факторов, с учётом специфики конкретного грунта и условий эксплуатации.

Результаты

Взаимодействие фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла № 3 с жидким стеклом плотности $1,16 \text{ г/см}^3$ проявляет уникальные особенности, важные для понимания процессов твердения шлакосиликатных материалов. Изначально процесс протекает аналогично самотормозящимся реакциям: наблюдается быстрый переход компонентов в жидкую фазу, после чего содержание оксида кальция (CaO) в растворе начинает снижаться. Это свидетельствует о начальном интенсивном растворении реагентов в жидком стекле.

После этого происходит замедление реакций, обусловленное снижением концентрации активных компонентов в растворе. Медленные химические реакции между растворённой известью (CaO) и кремнезёмом (SiO_2) приводят к образованию новых соединений, нерастворимых в щелочной среде. Эти нерастворимые новообразования, такие как гидросиликаты кальция, выпадают в осадок. Данный феномен подтверждается экспериментальными наблюдениями: при длительном хранении фильтрата, полученного после фильтрации суспензии фосфорного шлака или фосфорсодержащего стекла с жидким стеклом, на стенках колб образуется осадок в виде очень тонкодисперсного белого порошка.

Образование вторичных продуктов в жидкой фазе происходит за счёт взаимодействия различных анионов с коллоидными частицами гидроксидов кальция и магния. В частности, кремнекислородные (Si-O), алюмокислородные (Al-O) и аналогичные им анионы взаимодействуют с этими коллоидными частицами. На поверхности частиц шлака или фосфорсодержащих стёкол образуются ионогенные центры с отрицательным зарядом, способные адсорбировать катионы кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}) из раствора. Гидроксильные ионы (OH^-), связанные с этими катионами, формируют второй диффузный слой вокруг частиц, что влияет на электрическую двойную слойность и стабильность системы.

Поглощение извести и окиси магния приводит к развитию сорбционных процессов, в результате которых на поверхности частиц формируются вторичные продукты. Эти продукты представлены гидросиликатами и гидроалюмосиликатами кальция или магния. Формирование таких соединений способствует упрочнению структуры материала, повышая его механические свойства, такие как прочность и долговечность. Эти процессы особенно важны при использовании шлакосиликатных материалов в строительстве и грунтоукреплении.

Несмотря на низкую растворимость окиси кальция в щелочной среде, в жидкой фазе происходит непосредственное взаимодействие ионов кальция с кремнекислородными анионами. Кальциевые катионы, обладающие высокой ионной силой и зарядом, присоединяются к полимерным цепям кремнекислородных анионов жидкого стекла. Это приводит к разрыву полимерных цепей и замене ковалентных связей на ионные, то есть связи типа Si-O-Si преобразуются в связи Si-O-Ca²⁺-O-Si.

Внедрение катионов кальция в структуру жидкого стекла вызывает деструкцию его полимерной сети. Разрыв полимерных кремнекислородных цепей происходит не хаотично, а зависит от соотношения концентраций Ca²⁺ и Na⁺ в системе. Количество доступных кальциевых катионов влияет на степень разветвления и длину получающихся после разрыва цепочек. Ионы натрия (Na⁺), присутствующие в жидком стекле, также играют роль в стабилизации заряда и влияют на процесс деструкции.

Понимание этих химических процессов имеет важное практическое значение при разработке и использовании шлакосиликатных вяжущих в строительстве. Контроль над концентрациями компонентов, такими как плотность жидкого стекла и содержание ионов кальция и натрия, позволяет регулировать процессы твердения и формирование структуры материала. Это, в свою очередь, влияет на конечные физико-механические свойства укрепленных грунтов и строительных смесей.

Например, при стабилизации грунтов или изготовлении строительных блоков важно обеспечить оптимальное образование гидросиликатов кальция, которые придают материалу прочность и устойчивость к внешним воздействиям. Регулируя условия реакции, можно добиться формирования желаемых свойств материала, что способствует повышению надёжности и долговечности строительных конструкций.

Взаимодействие фосфорного шлака и фосфорсодержащего стекла с жидким стеклом является сложным многокомпонентным процессом, включающим растворение, химические реакции и образование новых фаз. Глубокое понимание этих процессов позволяет оптимизировать составы шлакосиликатных материалов для различных строительных целей. Это открывает возможности для создания более эффективных и устойчивых материалов, отвечающих современным требованиям строительства и эксплуатации сооружений.

Выводы

При взаимодействии гранулированного фосфорного шлака и фосфорсодержащих стёкол с жидким стеклом происходит коррозия частиц исходных материалов. Однако полное разрушение этих частиц предотвращается благодаря образованию на их поверхности плёнки, состоящей из продуктов реакции с жидким стеклом. Эта защитная плёнка замедляет дальнейшую коррозию и способствует сохранению структуры материала.

В процессе взаимодействия наблюдаются два типа реакций. Первый тип — самотормозящие реакции, которые замедляются по мере накопления продуктов реакции в системе. Второй тип включает три последовательных

процесса: сначала происходит насыщение жидкой фазы продуктами разложения исходных компонентов, затем образуются гидросиликаты кальция, и в итоге эти новообразования выпадают в осадок.

Увеличение нагрузки при уплотнении грунтов, укрепленных шлакосиликатным вяжущим, приводит к повышению прочности укрепленного грунта и снижению расхода раствора жидкого стекла. Эта закономерность основана на физических принципах уплотнения материалов с коагуляционным типом структуры. Под действием повышенной нагрузки в грунте происходят необратимые сдвиги частиц и их агрегатов, что способствует более плотной упаковке и упрочнению структуры материала.

Таким образом, оптимизация процесса уплотнения и контроль прикладываемых нагрузок при укреплении грунтов шлакосиликатными вяжущими позволяют не только улучшить физико-механические свойства грунта, но и снизить затраты на материалы, такие как жидкое стекло. Понимание механизмов взаимодействия компонентов и влияния технологических параметров на свойства укрепленных грунтов является ключевым для разработки эффективных строительных технологий и обеспечения долговечности сооружений.

Литература

1. Соколов, В.Е. Химическое закрепление грунтов: научное издание / В.Е. Соколов. - М. : Стройиздат, 1980. - 119 с.
2. Antunes, A. An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning / A. Antunes, A. Seco, N. Pinto // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Maiden: Blackwell Publishing, 2003. - Vol. 18. - P. 224-240.
3. Борисов, Г.А. Методы поиска наивыгоднейшего варианта сети лесовозных дорог / Г.А. Борисов, В.Д. Кукин, В.И. Кузина // Известия вузов. Лесной журнал. 2001. - №3. - С. 64-70.
4. Герасимов, Ю.Ю. Перспективы применения новых информационных технологий в лесном комплексе / Ю.Ю. Герасимов, Г.А. Давыдков, С.А. Кильпеляйнен, А.П. Соколов, В.С. Сютёв // Известия вузов. Лесной журнал. 2003. - №5. - С. 122-128.
5. Питухин, А.В. Расчёт дорожных конструкций лесовозных автомобильных дорог / А.В. Питухин, А.Н. Петров // Транспортное дело России. 2011. № 1 (86). - С. 120-123.
6. Андреев, В.Н. Принятие оптимальных решений в лесном комплексе. / В.Н. Андреев, Ю.Ю. Герасимов. Йоэнсуу: Изд-во университета Йоэнсуу, 1999. - 200 с.
7. Шегельман, И.Р. Лесная промышленность и лесное хозяйство: словарь. 4-е изд., перераб. и доп. / И.Р. Шегельман. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. - 278 с.
8. Козлов, В.Г. Методологические основы регулирования водно-теплового режима лесовозных автомобильных дорог / В.Г. Козлов, Р.С. Сапелкин, А.В. Скрыпников, В.А. Зеликов, Е.Ю. Микова, Казачек М.Н. Воронеж: Изд-во ВГАУ им. Императора Петра I, 2023. - 110 с.
9. Брюховецкий А.Н. Система конечно-разностных уравнений для определения тепловых характеристик грунтов лесовозных автомобильных дорог // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции (Воронеж, 01 марта – 28 апреля 2023 года). - Воронеж, 2023. - С. 92-101.

10. Брюховецкий А.Н. Комплексный метод измерения тепловлажностных свойств грунтов земляного полотна// Строительные и дорожные машины- 2023, № 4 - С.27-33.

References

1. Sokolovich, V.E. Chemical fixation of soils: scientific edition / V.E. Sokolovich. - M. : Stroyizdat, 1980. - 119 p.
2. Antunes, A. An Accessibility-Maximization Approach to Road Network Planning / A. Antunes, A. Seco, N. Pinto // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Maiden: Blackwell Publishing, 2003. - Vol. 18. - P. 224-240.
3. Borisov, G.A. Methods of searching for the most advantageous variant of a network of logging roads / G.A. Borisov, V.D. Kukin, V.I. Kuzina // News of universities. Forest magazine. 2001. - No. 3. - pp. 64-70.
4. Gerasimov, Yu.Yu. Prospects for the application of new information technologies in the forest complex / Yu.Yu. Gerasimov, G.A. Davydkov, S.A. Kilpelainen, A.P. Sokolov, B.C. Syunev // Izvestiya vuzov. Forest magazine. 2003. - No.5. - pp. 122-128.
5. Pitukhin, A.B. Calculation of road structures of logging highways / A.B. Pitukhin, A.N. Petrov // Transport business of Russia. 2011. No. 1 (86).-pp. 120-123.
6. Andreev, V.N. Making optimal decisions in the forest complex. / B.N. Andreev, Yu.Yu. Gerasimov. Joensuu: Publishing House of the University of Joensuu, 1999. -200 p.
7. Shegelman, I.R. Forest industry and forestry: a dictionary. 4th ed., re-slave. and additional / I.R. Shegelman. Petrozavodsk: Publishing House of PetrSU, 2008. - 278 p.
8. Kozlov, V.G. Methodological foundations of regulation of the water-thermal regime of logging roads/ V.G. Kozlov, R.S. Sapelkin, A.V. Skrypnikov, V.A. Zelikov, E.Yu. Mikova, Kazachek M.N. Voronezh: Publishing House of the VGU named after Emperor Peter I, 2023.-110с.
9. Bryukhovetsky A.N. System of finite difference equations for determining thermal characteristics of soils of logging roads//Theory and practice of innovative technologies in agriculture: proceedings of the National Scientific and practical conference (Voronezh, March 01 – April 28, 2023).- Voronezh, 2023.-pp.92-101.
10. Bryukhovetsky A.N. A comprehensive method for measuring the thermal and moisture properties of the soil of the roadbed// Construction and road vehicles - 2023, No. 4 - pp.27-33.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Викулин Игорь Александрович	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», экстрен кафедры «Информационной безопасности», ivikylin@inbox.ru ORCID 0000-0001-5072-6748
Скряпников Алексей Алексеевич	преподаватель ЦК информационных технологий ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», aleksei-skrypnikov@inbox.ru SPIN-код 4571-7410
Сергеев Андрей Сергеевич	аспирант, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», ассистент кафедры «Автомобильные дороги и мосты», pnipu_sk@mail.ru SPIN-код 4351-0337 ORCID 0000-0002-5487-3987
Боровлев Юрий Алексеевич	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт неорганической химии им. А.В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук, borovlevy@mail.ru ORCID 0000-0003-3702-6194 AuthorID: 611950
Шульгин Дмитрий Петрович	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», экстерн кафедры «Информационной безопасности», skrypnikovvsafe@mail.ru
Самойленко Алексей Витальевич	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», экстерн кафедры «Информационной безопасности», skrypnikovvsafe@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)
Vikulin Igor Alexandrovich	Voronezh State University of Engineering Technologies, External Faculty of the Department of Information Security, ivikulin@inbox.ru ORCID 0000-0001-5072-6748
Skrypnikov Alexey Alekseevich	Lecturer of the Cyclical Commission of Information Technologies of the Voronezh State University of Engineering Technologies, aleksei-skrypnikov@inbox.ru SPIN-code 4571-7410
Sergeev Andrey Sergeevich	postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University, Assistant of the Department of Highways and Bridges, pnipu_sk@mail.ru SPIN-code 4351-0337 ORCID 0000-0002-5487-3987
Borovlev Yuri Alekseevich	Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of SB RAS, borovlevury@mail.ru ORCID 0000-0003-3702-6194 AuthorID: 611950
Shulgin Dmitry Petrovich	Voronezh State University of Engineering Technologies, External Faculty of the Department of Information Security, skrypnikovvsafe@mail.ru
Samoylenko Alexey Vitalievich	Voronezh State University of Engineering Technologies, External Faculty of the Department of Information Security, skrypnikovvsafe@mail.ru

статья поступила в редакцию 05.09.2024	одобрена после рецензирования 17.09.2024	принята к публикации 27.09.2024
the article was submitted 05.09.2024	approved after reviewing 17.09.2024	accepted for publication 27.09.2024

ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ И НЕСТАБИЛЬНОСТИ СКАЛЯРНЫХ ПОЛЕЙ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ В АППАРАТАХ ХИМИЧЕСКИХ И ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ В СВЕТЕ ЛИКВИДАЦИИ ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ

Инна Николаевна Пугачева	1	eco-inna@yandex.ru
Александр Борисович Емельянов✉	1	okipr-mip@mail.ru
Елена Вячеславовна Батурина	1	baturina1717@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий", проспект Революции, д. 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В химической, пищевой и смежных отраслях промышленности рабочие параметры в аппаратах изменяются в широких пределах. Зачастую это происходит в рамках одной технологической операции. Неравномерность, а также нестабильность полей рабочих параметров (скорости потока, температуры и др.) существенно влияет на работу промышленных аппаратов (экстракторов, теплообменников, фильтров, сушилок и т. д.) непрерывного и периодического действия. Вышеозначенные параметры оказывают существенное влияние на экологическую оценку промышленных производств в свете их техногенной опасности, теплового загрязнения атмосферы и энергоэффективности. Оценка неравномерности и нестабильности полей рабочих параметров чрезвычайно важна при проектировании и интенсификации большинства существующих типов оборудования, так как причиной неравномерности и нестабильности являются локальный подвод (отвод) потоков взаимодействующих фаз, колебания структуры и свойств обрабатываемого материала, пристенный эффект. Эти факторы неизбежны при создании и эксплуатации промышленных установок. Уточнили понятие конфигурации поля применительно к замкнутой цилиндрической области трехмерного пространства с заданным скалярным полем. Приведено математическое описание основных задач: описание конфигурации, оценка неравномерности и нестабильности поля. В качестве аппроксимирующей функции для определения конфигурации поля предлагается использовать интерполяционный многочлен Ньютона. Предложены методики описания конфигурации полей рабочих параметров в аппаратах химических и пищевых производств и оценка неравномерности и нестабильности полей при малом числе экспериментальных данных.

Ключевые слова: поля рабочих параметров, неравномерность, нестабильность, математическое описание, тепловое загрязнение атмосферы, энергоэффективность.

Для цитирования: Пугачева И. Н., Емельянов А. Б., Батурина Е. В. Оценка неравномерности и нестабильности скалярных полей рабочих параметров в аппаратах химических и пищевых производств в свете ликвидации техногенной опасности // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 65-70.

Original article

EVALUATION OF THE UNEVENNESS AND INSTABILITY OF SCALAR FIELDS OPERATING PARAMETERS IN CHEMICAL AND FOOD DEVICES PRODUCTION FACILITIES IN THE LIGHT OF THE ELIMINATION OF MAN-MADE HAZARDS

Inna N. Pugacheva	1	eco-inna@yandex.ru
Aleksandr B. Emelyanov ✉	1	okipr-mip@mail.ru
Elena V. Baturina	1	baturina1717@mail.ru

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

Abstract. In the chemical, food and related industries, operating parameters in devices vary widely. Often this happens within one technological operation. Unevenness, as well as instability of the fields of operating parameters (flow rate, temperature, etc.) significantly affects the operation of industrial devices (extractors, heat exchangers, filters, dryers, etc.) of continuous and periodic operation. The above parameters have a significant impact on the environmental assessment of industrial production in the light of their technogenic hazards, thermal pollution of the atmosphere and energy efficiency. Assessing the unevenness and instability of operating parameter fields is extremely important in the design and intensification of most existing types of equipment, since the cause of unevenness and instability is the local supply (outlet) of flows of interacting phases, fluctuations in the structure and properties of the material being processed, and the wall effect. These factors are inevitable when creating and operating industrial installations. We clarified the concept of field configuration in relation to a closed cylindrical region of three-dimensional space with a given scalar field. A mathematical description of the main tasks is given: description of the configuration, assessment of field unevenness and instability. It is proposed to use Newton's interpolating polynomial as an approximating function to determine the field configuration. Methods are proposed for describing the configuration of fields of operating

parameters in chemical and food production equipment and for assessing the unevenness and instability of fields with a small number of experimental data.

Keywords: fields of operating parameters, unevenness, instability, mathematical description, thermal pollution of the atmosphere, energy efficiency.

For citation: Pugacheva I. N., Emelyanov A. B., Baturina E. V. Evaluation of the unevenness and instability of scalar fields operating parameters in chemical and food devices production facilities in the light of the elimination of man-made hazards. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 65-70. (In Russ.).

Введение

Как известно, неравномерность, а также нестабильность полей рабочих параметров (скорости потока, температуры и др.) существенно влияет на работу промышленных аппаратов как непрерывного, так и периодического действия (экстракторов, теплообменников, фильтров, сушильных установок, печей и т.д.).

Под неравномерностью поля обычно понимают отклонения (при фиксированной, например, относительно времени конфигурации поля) локальных значений параметра друг от друга или от среднего их значений.

Под нестабильностью поля будем понимать изменение его конфигурации с течением времени или при изменении входных параметров.

Среди причин неравномерности и нестабильности можно отметить локальный подвод (отвод) потоков взаимодействующих фаз, колебания структуры и свойств обрабатываемого материала, пристенный эффект, т.е. факторы, практически неизбежные при создании и эксплуатации промышленных установок.

Понятно, что оценка этих показателей поля важна не только при разработке и совершенствовании конструкций многих типов оборудования, но и для решения глобальных экологических проблем, таких как «парниковый» эффект, тепловое загрязнение атмосферы, соответственно, снижение техногенной опасности и повышение энергоэффективности производств. При этом возникают три основные задачи: описание конфигурации, оценка неравномерности, оценка нестабильности поля.

На практике обычно экспериментально определена совокупность локальных значений параметра поля. Получение их количества, необходимого для решения задач об оценках неравномерности и нестабильности поля с помощью статистических характеристик (средней арифметической, коэффициента вариации, размаха и т.п.) часто требует значительных трудовых и других затрат (например, при промышленных испытаниях крупнотоннажных сушилок) или сопряжено с техническими

трудностями. Поэтому желательно при наличии статистики (совокупности) малого объема получать улучшенные (более точные) оценки упомянутых выше показателей поля.

Материалы и методы, результаты и их обсуждение

Рассмотрим математические описания каждой из поставленных задач.

Вначале уточним понятие конфигурации поля применительно к широко распространенному случаю, когда в некоторой замкнутой цилиндрической области Ω трехмерного пространства задано скалярное поле

$$\vartheta = F(x, y, \tau),$$

где x, y – переменные произвольной природы, τ – время.

Через D обозначим проекцию области Ω на плоскость xOy (предполагается, что все сечения области Ω плоскостями $\tau = const$ конгруэнтны друг другу). При фиксированном значении τ функцию $F(x, y, \tau)$ на D будем обозначать $f(x, y)$ (а при необходимости $f_\tau(x, y)$) и называть ее конфигурацией поля в момент времени τ . Таким образом, при фиксированном τ

$$F(x, y, \tau) = f(x, y).$$

Напомним, что нам известны локальные значения параметра ϑ , т.е. значения функции $f(x, y)$ в некоторых точках (узлах) области D . С математической точки зрения задача определения конфигурации (приближенной) поля является широко известной задачей подбора аппроксимирующей функции по заданным табличным значениям функции $f(x, y)$. В качестве аппроксимирующей функции предлагается использовать интерполяционный многочлен Ньютона [1]. Интерполяционный многочлен сохраняет в себе полученную опытным путем информацию об объекте, значительно дополняет ее и распространяет с той или иной точностью знание об изучаемом объекте на всю область D . Так как представление функции $f(x, y)$ двух переменных интерполяционным многочленом $P(x, y, \tau)$ связано с некоторыми техническими трудностями, то предлагается во-первых, выбирать узлы (точки измерений) таким образом, чтобы запись многочлена в

явном виде была наиболее простой; во-вторых, кроме «удобных» точек (узлов) необходимо иметь еще дополнительный запас случайных (произвольных) точек для проверки точности аппроксимации (оценка погрешности замены функции двух и более переменных интерполяционными многочленами весьма затруднительна); в-третьих, область D разбивать на подобласти и строить многочлены в каждой из подобластей, что повышает естественно, точность аппроксимации (хотя исходящая непрерывная функция $f(x, y)$ в этом случае может приближаться на D , вообще говоря, разрывной) и, следовательно, позволяет выявить локальные особенности поведения объекта[2].

Под мерой неравномерности поля

$$\vartheta = F(x, y, \tau),$$

при фиксированном значении τ будем понимать одно из чисел $(R - z)$,

$$\max\{(R - f_{cp}), (f_{cp} - z)\},$$

где $R = \max f(x, y)$, $z = \min f(x, y)$,

интегральная средняя

$$f_{cp} = \frac{\iint_D f(x, y) dx dy}{\text{mes} D}.$$

Поскольку неизвестна сама функция $f(x, y)$ (только известны ее приближенные значения в узлах), то неизвестна и ее интегральная средняя [3]. В качестве приближенного значения интегральной средней f_{cp} возьмем значение интегральной средней $P_{cp}(x, y; f)$ интерполяционного многочлена. По аналогии сравнения точностей интегрирования функции одной переменной методами прямоугольников и Симпсона можно утверждать, что при малом числе узлов интегральная средняя интерполяционного многочлена существенно ближе к неизвестному истинному f_{cp} , чем средняя арифметическая значений функции $f(x, y)$ в узлах [4]. Поэтому за оценку неравномерности поля примем или разность

$$(R(P) - z(P)),$$

или \max , где

$$R(P) = \max_D P(x, y; f),$$

$$z(P) = \min_D P(x, y; f),$$

$$P_{cp} = P_{cp}(x, y; f).$$

Заметим, что $z(P)$, $R(P)$ вычисляются обычными средствами математического анализа. Переходим к рассмотрению задачи об оценке нестабильности поля.

Пусть

$$f_1(x, y) = f_{\tau_1}(x, y), f_2(x, y) = f_{\tau_2}(x, y)$$

– конфигурации поля в моменты времени τ_1, τ_2 , и значения функций $f_1(x, y), f_2(x, y)$ в одних и тех же узлах области D известны.

За меру нестабильности поля $F(x, y, \tau)$ в интервале $[\tau_1, \tau_2]$ примем число

$$\Delta = M - m,$$

где $M = \max \vartheta(x, y)$,

$$m = \min \vartheta(x, y),$$

$$\vartheta(x, y) = f_1(x, y) - f_2(x, y),$$

$$f_1(x, y) = f_{\tau_1}(x, y),$$

$$f_2(x, y) = f_{\tau_2}(x, y).$$

В качестве оценки нестабильности поля в интервале $[\tau_1, \tau_2]$ возьмем разность

$$\Delta(Q) = M(Q) - m(Q),$$

здесь $M(Q) = \max Q(x, y; f_1, f_2)$,

$$m(Q) = \min Q(x, y; f_1, f_2),$$

$$Q(x, y; f_1, f_2) = P(x, y; f_1) - P(x, y; f_2),$$

$P(x, y; f_1)$ и $P(x, y; f_2)$ – интерполяционные многочлены функций $f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$ соответственно. Отсюда попутно получаем неравенство

$$m(Q) \leq f_1(x, y) - f_2(x, y) \leq M(Q) \quad (1)$$

Естественно, неравенство понимается с точностью до суммарной погрешности метода и вычислений [5]. Неравенство (1) позволяет детализировать, если это необходимо, взаиморасположение функций $f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$. Например, если $m(Q) = M(Q)$, то функции эквидистантные, однако нахождение оценки $\Delta(Q)$ нестабильности поля на практике требует значительного объема вычислений. Иногда введением другой меры и, следовательно, иной оценки удастся уменьшить его [6]. Например, для неотрицательного поля за меру нестабильности в интервале $[\tau_1, \tau_2]$ можно принять относительную погрешность

$$\varepsilon(f_1, f_2) = \frac{|f_{1cp} - f_{2cp}|}{\max\{f_{1cp}, f_{2cp}\}}, \quad (2)$$

где f_{1cp}, f_{2cp} – интегральные средние функций $f_1(x, y), f_2(x, y)$, а в качестве оценки нестабильности поля в том же интервале число

$$\delta(f_1, f_2) = \frac{|P_{cp}(x, y; f_1) - P_{cp}(x, y; f_2)|}{\max\{P_{cp}(x, y; f_1), P_{cp}(x, y; f_2)\}}. \quad (3)$$

Но уменьшение объема вычислений в данном случае приведет к потере общности применения меры (2) и оценки (3). В самом деле, если $\varepsilon(f_1, f_2)$, $\delta(f_1, f_2)$ достаточно велика, т.е. превышает некоторую заданную величину, то поле нестабильно. Если же относительная погрешность (2) (величина (3)) мала, то использовать ее в качестве меры (оценки) нестабильности поля нельзя, так как функции, средние интегральные которых равны или мало разнятся, могут как существенно отличаться друг от друга, так и совпадать [7-9].

Поэтому, например, если есть основания предполагать поле нестабильным, то для проверки этой гипотезы можно использовать

оценку (3). Возможно число (3) рассматривать и как предварительную оценку неустойчивости [10, 11].

Изложенная методика была частично применена авторами при решении вопроса о неравномерности и неустойчивости поля величин скоростей в сушильной камере с площадью сечения воздушного потока 25 м². В качестве модели конфигурации поля был взят интерполяционный многочлен Ньютона [1] вида

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x - x_0) \dots (x - x_{i-1})(y - y_0) \dots (y - y_{i-1}) f(x_0, \dots, x_i, y_0, y_j),$$

где $f(x_0, \dots, x_i, y_0, y_j)$ – разделенные разности, при $m = n = 2$.

Выводы

1. Предложена методика описания конфигурации полей рабочих параметров в аппаратах химических и пищевых производств.

2. Предложена оценка неравномерности и неустойчивости полей при малом числе экспериментальных данных. Что позволяет значительно упростить процесс интенсификации промышленных процессов, повысить энергоэффективности, снизить техногенную опасность и сократить выбросы тепловой энергии и парниковых газов в атмосферу земли.

Литература

1. Математическое обеспечение интенсификации тепло- массообменных процессов в перерабатывающих отраслях АПК. Емельянов А.Б., Батурина Е.В. В сборнике: *Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство. Материалы IX Международной научно-технической конференции.* Воронеж, 2024. С. 122-123.
2. Ресурсосберегающий метод интенсификации режимов сушки в перерабатывающих отраслях АПК. Емельянов А.Б., Батурина Е.В. В сборнике: *Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство. VIII Международная научно-техническая конференция.* Воронеж. гос. ун-т инж. технол., 2023. С. 271-273.
3. Application of drying acceleration to study the forms of moisture bond in currant fruits. Antipov S.T., Emelyanov A.B., Baturina E.V., Kazartsev D.A., Babenko D.S., Posnova G.V. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies.* 2023. Т. 85. № 1 (95). С. 17-23.
4. On the issue of studying the forms of moisture coupling in thermolabile heterogeneous products. Emelyanov A.B., Rudyka E.A., Baturina E.V., Kazartsev D.A., Babaeva M.V., Zhukovskaya S.V. В сборнике: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilities of Agricultural Processing" 2021.* С. 072009.
5. Application of a by-product in the production of pressed baker yeast for separating rubber from latex. Nikulina N.S., Bulatetskaya T.M., Nikulin S.S., Baturina E.V., Sannikova N.Yu., Pugacheva I.N. В сборнике: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilities of Agricultural Processing" 2021.* С. 072010.
6. Automatic control of the methionine extraction process from food enterprises wastewater. Shakhov S.V., Molokanova L.V., Ponomareva E.N., Pugacheva I.N., Kutsova A.E., Glotova I.A. В сборнике: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilities of Agricultural Processing" 2021.* С. 072026.
7. Отход пивоваренного производства - компонент комбинированного коагулянта для синтеза каучука. Никулин С.С., Овчаренко С.Р., Пугачева И.Н., Молоканова Л.В. В сборнике: *Экологические проблемы промышленных городов. Сборник научных трудов по материалам 10-й Международной научно-практической конференции.* Саратов, 2021. С. 78-82.
8. Prospect of using beet molasses in the production of synthetic rubbers. Nikulina N.S., Bulatetskaya T.M., Nikulin S.S., Pugacheva I.N., Vlasova L.A., Rudyka E.A. В сборнике: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Technology of Sugars, Saccharine Products and Alcohol" 2021.* С. 052010.
9. The procedure for defining the temperature conditions for food dehydration. Arapov V.M., Kazartsev D.A., Emelyanov A.B., Egorova G.N., Babaeva M.V., Zhukovskaya S.V. В сборнике: *IOP Confer-*

ence Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Technology of Sugars, Saccharine Products and Alcohol" 2021. С. 062008.

10. Способ автоматического управления процессом ионообменной сорбции аминокислот из сточных вод в непрерывном режиме. Куцова А.Е., Молоканова Л.В., Шахов С.В., Пугачева И.Н., Пономарева Е.Н. Патент на изобретение RU 2737773 C1, 02.12.2020. Заявка № 2020111508 от 19.03.2020.

11. Изучение форм связи влаги в семенах кориандра на основе анализа кинетики сушки. Антипов С.Т., Казарцев Д.А., Давыдов А.М., Емельянов А.Б. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 3 (85). С. 24-31.

References

1. Mathematical support for the intensification of heat and mass transfer processes in the processing industries of the agro-industrial complex. Emelyanov A.B., Baturina E.V. In the collection: Innovative technologies in the food industry: science, education and production. Materials of the IX International Scientific and Technical Conference. Voronezh, 2024. pp. 122-123.

2. Resource-saving method of intensification of drying modes in the processing industries of the agro-industrial complex. Emelyanov A.B., Baturina E.V. In the collection: Innovative technologies in the food industry: science, education and production. VIII International Scientific and Technical Conference. Voronezh. State University of Engineering Technology, 2023. pp. 271-273.

3. Application of drying acceleration to study the forms of moisture bond in currant fruits. Antipov S.T., Emelyanov A.B., Baturina E.V., Kazartsev D.A., Babenko D.S., Posnova G.V. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2023. Т. 85. № 1 (95). С. 17-23.

4. On the issue of studying the forms of moisture coupling in thermolabile heterogeneous products. Emelyanov A.B., Rudyka E.A., Baturina E.V., Kazartsev D.A., Babaeva M.V., Zhukovskaya S.V. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilities of Agricultural Processing" 2021. С. 072009.

5. Application of a by-product in the production of pressed baker yeast for separating rubber from latex. Nikulina N.S., Bulatetskaya T.M., Nikulin S.S., Baturina E.V., Sannikova N.Yu., Pugacheva I.N. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilities of Agricultural Processing" 2021. С. 072010.

6. Automatic control of the methionine extraction process from food enterprises wastewater. Shakhov S.V., Molokanova L.V., Ponomareva E.N., Pugacheva I.N., Kutsova A.E., Glotova I.A. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilities of Agricultural Processing" 2021. С. 072026.

7. Brewing waste is a component of a combined coagulant for the synthesis of rubber. Nikulin S.S., Ovcharenko S.R., Pugacheva I.N., Molokanova L.V. In the collection: Environmental problems of industrial cities. Collection of scientific papers based on the materials of the 10th International Scientific and Practical Conference. Saratov, 2021. pp. 78-82.

8. Prospect of using beet molasses in the production of synthetic rubbers. Nikulina N.S., Bulatetskaya T.M., Nikulin S.S., Pugacheva I.N., Vlasova L.A., Rudyka E.A. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Technology of Sugars, Saccharine Products and Alcohol" 2021. С. 052010.

9. The procedure for defining the temperature conditions for food dehydration. Арапов V.M., Kazartsev D.A., Emelyanov A.B., Egorova G.N., Babaeva M.V., Zhukovskaya S.V. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Technology of Sugars, Saccharine Products and Alcohol" 2021. С. 062008.

10. A method for automatic control of the process of ion exchange sorption of amino acids from wastewater in a continuous mode. Kutsova A.E., Molokanova L.V., Shakhov S.V., Pugacheva I.N., Ponomareva E.N. Patent for invention RU 2737773 C1, 02.12.2020. Application No. 2020111508 dated 03/19/2020.

11. To study the forms of moisture bonding in coriander seeds based on the analysis of drying kinetics. Antipov S.T., Kazartsev D.A., Davydov A.M., Yemelyanov A.B. Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020. Vol. 82. No. 3 (85). pp. 24-31.

Сведения об авторах

ФИО	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Пугачева Инна Николаевна	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой «Промышленной экологии и техносферной безопасности», декан факультета Экологии и химической технологии, eco-inna@yandex.ru SPIN-код 2326-8420 ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000
Емельянов Александр Борисович	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры «Промышленной экологии и техносферной безопасности», okipr-mip@mail.ru SPIN-код 4461-3480 ORCID 0000-0002-8428-4279
Батурина Елена Вячеславовна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры «Промышленной экологии и техносферной безопасности», baturina1717@mail.ru SPIN-код 4434-7897 ORCID 0000-0002-7561-7027

Authors information

Last name, first name, patronymic	<i>Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)</i>
Pugacheva Inna Nikolaevna	DSc, Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Head of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, Dean of the Faculty of Ecology and Chemical Technology, eco-inna@yandex.ru SPIN-code 2326-8420 ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000
Emelyanov Alexander Borisovich	PhD, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, okipr-mip@mail.ru SPIN-code 4461-3480 ORCID 0000-0002-8428-4279
Baturina Elena Viacheslavovna	PhD, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, baturina1717@mail.ru SPIN-code 4434-7897 ORCID 0000-0002-7561-7027

статья поступила в редакцию 01.07.2024	одобрена после рецензирования 15.07.2024	принята к публикации 10.09.2024
the article was submitted 01.07.2024	approved after reviewing 15.07.2024	accepted for publication 10.09.2024

ВУЛКАНИЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ В РЕЦЕПТУРЕ РЕЗИН НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ КАУЧУКОВ

Ольга Викторовна Карманова [✉] 1 karolga@mail.ru
Юрий Федорович Шутилин 1 shurf7@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Работа посвящена изучению свойств резин на основе смесей разнополярных и каучуков, вулканизирующая группа которых включала ускорители вулканизации разных классов (тиазолы, гуанидин), в том числе их комбинации, а также активаторы вулканизации - оксид цинка и стеариновую кислоту, участвующие в образовании действительных агентов вулканизации на начальном этапе процесса. Изучены кинетические особенности образования пространственной структуры смесей диеновых каучуков при вулканизации. Методом температурной релаксации определены температуры стеклования композиций, которые легли в основу определения коэффициента распределения вулканизирующего агента (серы) между фазами совмещаемых каучуков. Выявлено, что неравномерность распределения серы обусловлена различиями в релаксационных свойствах совмещаемых каучуков. Показано, что применение комбинаций тиазольных ускорителей с дифенилгуанидином приводит к ускорению вулканизации.

Ключевые слова: серная вулканизация, активатор вулканизации, распределение серы, кинетика вулканизации.

Для цитирования: Карманова О. В., Шутилин Ю. Ф. Вулканизирующие системы в рецептуре резин на основе смесей каучуков // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 71-77.

Original article

VULCANISING SYSTEMS IN RUBBERS BASED ON RUBBER BLENDS

Olga V. Karmanova [✉] 1 karolga@mail.ru
Yuri F. Shutilin 1 shurf7@mail.ru

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

Abstract. The work is devoted to studying the properties of rubbers based on mixtures of different polarity and rubbers, the vulcanizing group of which included vulcanization accelerators of different classes (thiazoles, guanidine), including their combinations, as well as vulcanization activators - zinc oxide and stearic acid, participating in the formation of actual vulcanization agents at the initial stage of the process. Kinetic features of formation of the spatial structure of diene rubber mixtures during vulcanization were studied. The glass transition temperature of the compositions was determined by the temperature relaxation method. It formed the basis for determining the distribution coefficient of the vulcanizing agent (sulfur) between the phases of the compatible rubbers. It is shown that the unevenness of the sulfur distribution is due to differences in the relaxation properties of the compatible rubbers. The use of combinations of thiazole accelerators with diphenylguanidine leads to acceleration of vulcanization.

Keyword: sulfur curing, activator, curing kinetics, sulfur distribution.

For citation: Karmanova O. V., Shutilin Yu. F. Vulcanising systems in rubbers based on rubber blends. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 71-77. (In Russ.).

Введение

При разработке рецептур резин для изделий, эксплуатирующихся при пониженных температурах основными принципами являются: применение каучука с низкой температурой стеклования (T_c), в которых затруднена кристаллизация; введение пластификаторов; правильный выбор вулканизирующей группы; учет типа и дозировки наполнителей; использование смесей каучуков [1]. Особую актуальность приобретают исследования, направленные на создание морозостойких резиновых уплотнителей, работоспособных в среде масел и топ-

лив [2], к которым предъявляются различные, зачастую противоречивые требования: малая степень набухания в агрессивной среде, низкая остаточная деформация сжатия, низкая T_c и высокий коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению; требуемый уровень физико-механических показателей.

При правильном выборе вулканизирующей группы можно обеспечить повышение морозостойкости резин на основе полярных и неполярных каучуков. Известно [3], что в ходе вулканизации каучука с увеличением количества поперечных связей уменьшается свободный

объем. Это должно привести к повышению температуры стеклования и снижению коэффициента морозостойкости резин. Но благодаря тому, что расстояние между узлами пространственной сетки в вулканизатах каучуков обычно больше длины кинетического сегмента, T_c повышается незначительно. Поэтому, регулируя плотность поперечного сшивания можно добиться увеличения морозостойкости резин. В серных вулканизирующих системах в качестве активатора применяется оксид цинка, что обеспечивает повышенное количество поперечных связей различной силы и природы и формирование прочной сетчатой структуры вулканизата [4].

Образование поперечных связей оказывает влияние и на кристаллизацию каучука, что обусловлено нарушением регулярности макроцепей. Установлено [5], что для резин на основе полиизопрена и полибутадиена кристаллизация замедляется в присутствии серных вулканизирующих систем с тиазолами, а также с сульфенамидными ускорителями.

Главной проблемой при изготовлении смесей полимеров, когда для улучшения морозостойкости к основному каучуку добавляют второй каучук с хорошими низкотемпературными свойствами, являются вопросы совместимости полимеров разных типов, так как большинство подобных композиций являются термодинамически несовместимыми и характеризуются двумя температурами стеклования. При разработке рецептур резиновых смесей на основе каучуков одной из ключевых проблем является подбор условий для обеспечения растворимости агентов вулканизации и совулканизации каучуков, а также возможности регулирования распределения вулканизирующих агентов в смеси полимеров для обеспечения хорошего совпадения скоростей вулканизации в разных фазах [6].

При получении композиций из смесей эластомеров происходит перераспределение компонентов между ними, а при вулканизации полученных композиций происходит миграция вулканизирующего агента из медленновулканизуемой в быстро вулканизируемую фазу, что приводит к изменению степени сшивания и свойств вулканизатов.

С целью обеспечения равномерности распределения вулканизирующей группы в резинах на основе морозостойкого (СКД) и маслобензостойкого (СКН-40) каучуков изучена возможность применения комплексного активатора серной вулканизации Вулкатив в ре-

цептуре изделий, эксплуатируемых при пониженных температурах.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов для исследования использовали резиновые смеси на основе каучуков СКД, СКИ-3 и СКН-40 в соотношении 1:1, включающие вулканизирующие системы с ускорителями вулканизации разных типов - тиазолы: 2-меркаптобензтиазол (МБТ), ди(2-бензтиазол)дисульфид (ДБТД); дифенилгуанидин (ДФГ); активаторы вулканизации: оксид цинка и стеариновую кислоту. В качестве альтернативы активаторам вулканизации использовали активатор Вулкатив (производитель ООО «Совтех», г. Воронеж). Комплексный активатор вулканизации Вулкатив представляет собой композицию оксида цинка (содержание которого в продукте не превышает 35 % мас.), карбоновых кислот и тонкодисперсного минерального носителя [7]. В рецептурах резиновых смесей заменяли активаторы вулканизации (оксид цинка, стеариновая кислота) на Вулкатив (дозировка опытного активатора эквивалентна суммарной дозировке оксида цинка и стеариновой кислоты).

Изготовление резиновых смесей осуществляли в лабораторном смесителе РС-0,1. Вулканизационные характеристики резиновых смесей определяли на реометре MDR-2000. Вулканизаты получали в вулканизационном прессе в соответствии режимом вулканизации, уточненным по результатам реометрических испытаний. Степень сшивания оценивали методом равновесного набухания резин в толуоле. Температуру стеклования образцов измеряли согласно ГОСТ Р 55135. Содержание свободной серы определяли по ОСТ 38.05244-81 экстракцией раствором сульфита натрия.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе проведены исследования по выявлению природы процессов, протекающих при вулканизации композиций на основе различных по химической природе, релаксационно-кинетическим характеристикам и свойствам каучуков. Варьируя типы каучуков и вулканизирующих систем можно получить информацию о характере процессов, протекающих при вулканизации и распределении вулканизирующей группы в эластомерной среде.

Исследовали смеси несовместимых каучуков СКН-40/СКД, СКН-40/СКИ-3. Для выявления различных механизмов вулканизации варьировали виды (ДБТД, МБТ и их смеси с ДФГ) и дозировки (от 1 до 5 мас.ч.) ускорителя

телей при постоянном отношении «сера : ускоритель» = 2 : 1.

В процессе вулканизации скорость присоединения серы к каучукам происходит согласно активности последних и может отличаться для разных каучуков. Это можно оценить по количеству связываемой серы каждым из каучуков, находящихся в смеси. Для вулканизатов индивидуальных каучуков и их комбинаций определены T_c , с помощью которых расчетным путем проведена оценка распределения серы между фазами каучуков в смеси. По методике [9] определены коэффициенты

распределения серы (K_p) между фазами каучуков СКН-40 и СКД, СКН-40 и СКИ-3. Суть методики заключается в построении калибровочной зависимости температуры стеклования индивидуального каучука от содержания вулканизующего агента (рисунок 1). Сопоставляя T_c фазы каучука в вулканизате из комбинации двух каучуков с калибровочной зависимостью вулканизата индивидуального каучука, определяли эффективную концентрацию серы C_3 в соответствующей фазе вулканизата. Результаты расчета коэффициентов распределения серы приведены в таблице 1.

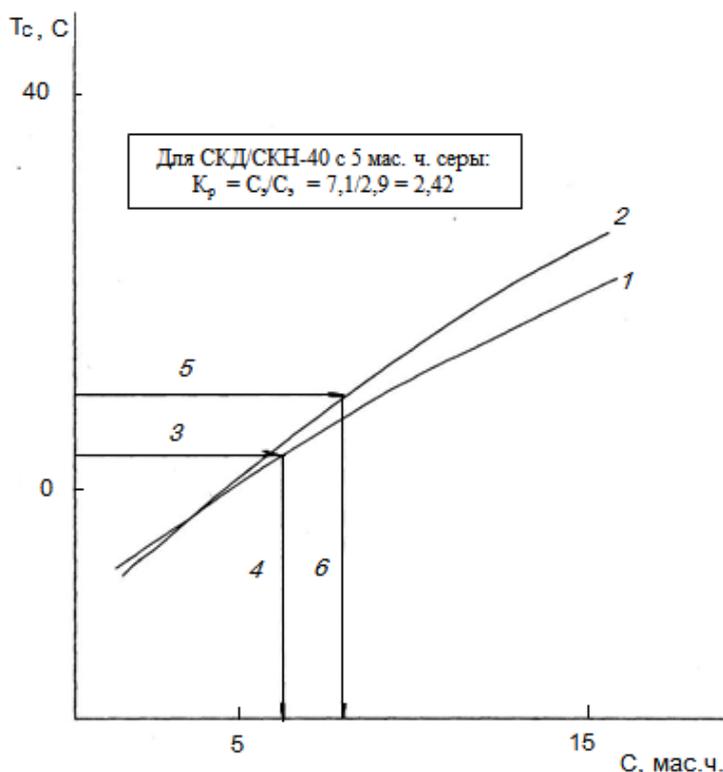


Рисунок 1. Зависимости температуры стеклования (T_c) от содержания серы (C) в вулканизатах: 1 - СКН-40, содержащий ДБДТ; 2 - СКН-40, содержащий МБТ; 3-4 - схема определения C_3 в смеси СКД/СКН-40 (5 мас. ч. серы); 5-6 - схема определения C_3 в смеси СКИ-3/СКН-40 (5 мас.ч. серы)

Figure 1. Glass transition temperature (T_g) dependences on sulfur content (C) in vulcanizates: 1 - SKN-40 with DBTD; 2 - SKN-40 with MBT; 3-4 - scheme for determining C_e in a mixture of SKD/SKN-40 (5 phr of sulfur); 5-6 - scheme for determining C_e in a mixture of SKI-3/SKN-40 (5 phr of sulfur)

Таблица 1. Коэффициенты распределения серы в вулканизатах смесей СКН-40 с каучуками СКД и СКИ-3

Table 1. Sulfur distribution coefficients in vulcanizates of SKN-40 mixtures with SKD and SKI-3 rubbers

Вулканизирующая группа / Vulcanizing group		СКД:СКН-40 / SKD:SKN-40	СКИ-3:СКН-40 / SKI-3:SKN-40
Тип ускорителя / Accelerator	Содержание серы, мас.ч / Sulfur content, phr.		
ДБДТ / DBTD	2,0	1,42	0,82
	5,0	2,42	0,86
	10,0	2,63	1,86
МБТ / MBT	2,0	1,50	0,90
	5,0	2,44	0,88
	10,0	2,64	1,50

Известно [10], что активность индивидуальных каучуков при вулканизации увеличивается в ряду СКД < СКН-40 < СКИ-3, что не совпадает с вышеприведенными данными о связывании серы этими каучуками в их комбинациях. Этот артефакт можно объяснить, если рассмотреть процесс образования поперечных связей как гетерогенную реакцию между макроцепями у поверхности твердых частиц активатора вулканизации. В этом случае скорость присоединения серы к макромолекулам каучука определяется скоростью обмена фрагментов макроцепей цепей у поверхности образовавшегося действительно агента вулканизации (ДАВ). Действительно [9], в условиях вулканизации скорость релаксации макроцепей возрастает в ряду СКИ 3 < СКН-40 < СКД, что совпадает с расчетами по присоединению серы к каучукам при их

комбинировании. Время релаксации полибутадиена значительно меньше, чем полиизопрена и бутадиен-нитрильного сополимера, поэтому более подвижные цепи СКД успевают большее количество раз прореагировать с поверхностью ДАВ и присоединить больше серы, а более химически активный СКН-40 присоединяет меньше серы, так как его макроцепи менее подвижны.

Аналогичные результаты получены для смесей каучуков в присутствии ускорителей вулканизации ДБДТ, МБТ и их комбинаций с ДФГ. Второй ускоритель - ДФГ обуславливает активацию тиазолов (ДБДТ и МБТ), что выражается в увеличении скорости сшивания, плотности поперечных связей (рисунок 2, а), при этом количество свободной серы изменялось незначительно (рисунок 2, б).

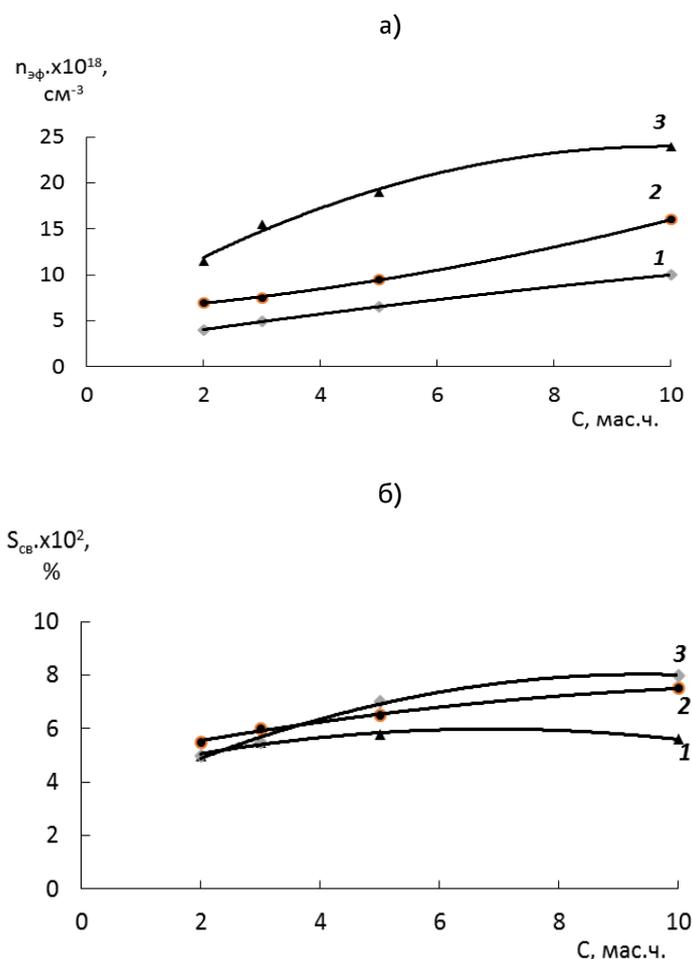


Рисунок 2. Зависимости концентрации поперечных связей $n_{эф.}$ (а) и содержания свободной серы $S_{св.}$ от концентрации вулканизирующего агента серы (С) в вулканизатах смесей каучуков: 1 - СКД/СКН-40 ; 2 - СКИ-3/СКН-40; СКН-40. Ускоритель вулканизации – ДБТД

Figure 2. Dependences of the concentration of cross-links $n_{эф.}$ (а) and the content of free sulfur $S_{св.}$ on the concentration of the vulcanizing agent sulfur (С) in the vulcanizates of rubber mixtures: 1 - SKD/SKN-40; 2 - SKI-3/SKN-40; SKN-40. Ускоритель вулканизации – ДБТД

Синергическое действие ускорителей в этом случае связано, вероятно, с увеличением скорости химических реакций присоединения

серы к эластомерам, в том числе с учетом скорости обмена их цепей у поверхности ДАВ (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты распределения серы в вулканизатах при комбинировании ускорителей вулканизации (содержание серы 5,0 мас.ч.)

Table 2. Sulfur distribution coefficients in rubbers when combining vulcanization accelerators sulfur content 5,0 phr

Ускорители вулканизации / Accelerators	Соотношение / Ratio	СКД:СКН-40 / SKD:SKN-40	СКИ-3:СКН-40 / SKI-3:SKN-40
ДБДТ:ДФГ / DBTD:DPG	3/1	1,78	0,82
	1/1	2,10	0,82
МБТ:ДФГ / MBT:DPG	3/1	2,12	0,80
	1/1	1,91	0,83

Полученные выводы нашли подтверждение и при анализе структурных характеристик вулканизатов смесей каучуков. Вулканизаты бутадиенового каучука характеризовались более высокой плотностью сшивки по сравнению с полиизопреном. В большей степени проявляется данная тенденция для образцов, содержащих в качестве ускорителя вулканизации меркаптобензтиазол. Формирование более плотной сетки поперечных связей в вулканизатах на основе индивидуального СКН-40, чем при его комбинировании с по-

либутадиеном и полиизопреном, обусловлена отсутствием микронеоднородностей из-за разделения фаз. Следует отметить, что содержание свободной серы изменялось незначительно с увеличением дозировки вулканизирующего агента. Исключение – образцы, содержащие 10 мас.ч., для которых увеличение содержания свободной серы свидетельствовало о деструкции пространственной сетки, что подтверждается и увеличением времени достижения оптимума вулканизации для этих образцов (таблица 3).

Таблица 3. Вулканизационные свойства композиций

Table 3. Vulcanization properties of compositions

Ускоритель вулканизации / Accelerators	Содержание ускорителя, мас.ч. / Accelerator content, phr	t_s , мин / t_s , min	t_{90} , мин / t_{90} , min	v , мин ⁻¹ / v , min ⁻¹	Степень сшивания M_{max} - M_{min} , Н·м / Degree of crosslinking M_{max} - M_{min} , Н·м
СКД:СКН-40 / SKD:SKN-40					
ДБДТ / DBTD	1,0	11,50	24,20	7,87	24,20
	2,5	6,75	13,85	14,08	41,20
МБТ / MBT	1,0	2,35	16,25	7,19	22,80
	2,5	1,25	12,55	8,85	36,70
СКИ-3:СКН-40 / SKI-3:SKN-40					
ДБДТ / DBTD	1,0	10,75	19,90	10,93	17,20
	2,5	5,20	8,70	28,57	44,65
МБТ / MBT	1,0	1,75	12,25	9,52	24,40
	2,5	1,00	10,50	10,53	38,70

Примечание: t_s – время начала вулканизации; t_{90} - время оптимума вулканизации; v - скорость вулканизации.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что при создании рецептур резиновых смесей на основе смесей каучуков необходимо учитывать релаксационные свойства применяемых каучуков, а для увеличения химической активности, например, можно использовать синергические смеси ускорителей вулканизации, что обусловит ускорение процесса вулканизации и более эффективное использование серы.

Выводы

В ходе испытаний установлено, что при получении резиновых смесей на основе комбинаций каучуков вулканизационная активность композиций определяется не только химической природой индивидуальных каучуков, но и их релаксационными свойствами. Для вулканизатов смесей каучуков СКД/СКН-40 и СКИ-3/СКН-40 проведен анализ распределения вулканизирующего агента между фа-

зами совмещаемых каучуков путем построения калибровочных зависимостей температуры стеклования каучука СКН-40 от концентрации серы и сопоставления с зависимостями температуры стеклования от концентрации вулканизирующего агента в его смеси с СКД и СКИ-3, рассчитаны коэффициенты распределения серы между фазами каучуков. Показано, что на распределение вулканизирующего агента оказывает влияние не только химическая активность каучука, но и его релаксационные свойства. Подтверждено, что вулканизация смесей эластомеров протекает как гетерогенный процесс путем взаимодействия раз-

нородных эластомерных петель с действительным агентом вулканизации, центром которых выступает активатор вулканизации, а скорость обмена петель у поверхности ДАВ характеризует количество присоединено к данному каучуку серы. Определены коэффициенты эффективности действия ускорителей при комбинировании 2-меркаптобензтиазола и ди(2-бензтиазол)дисульфида с дифенилгуанидином. Установлено, что в результате использования синергических смесей ускорителей снижается время достижения оптимума вулканизации.

Литература

1. Соколова М. Д., Шадрин Н. В., Давыдова М. Л. [и др.] Эластомерные материалы уплотнительного назначения для эксплуатации в условиях холодного климата России // *Каучук и резина*. – 2018. – Т. 77, № 6. – С. 402-409.
2. Чайкун А. М., Елисеев О. А., Наумов И. С., Венедиктова М. А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин // *Авиационные материалы и технологии*. – 2013. – № 3(28). – С. 53-55.
3. Мухин В. В., Петрова Н. Н., Лазарева Н. Н. [и др.] Влияние состава и технологии изготовления композиций на структуру и свойства морозостойких резин на основе смесей полярных и неполярных каучуков // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 346-357. – DOI 10.31242/2618-9712-2023-28-2-346-357.
4. Шершнева В.А. Развитие представлений о роли активаторов серной вулканизации углеродородных эластомеров. Часть 1 // *Каучук и резина*. 2012. № 1. С. 31.
5. Каблов В. Ф., Новопольцева О. М., Спиридонова М. П., Крюкова Д. А. Резины со специальными свойствами [Электронный ресурс] / ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгГТУ – Волжский, 2020. – Режим доступа <http://lib.volpi.ru>.
6. Карманова О. В., Калмыков В. В. Особенности формирования структуры вулканизатов // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2006. Т. 8, № 2. С. 112-116.
7. Карманова О. В., Тихомиров С. Г., Попова Л. В., Фатнева А. Ю. Исследование свойств резин в присутствии композиционного активатора вулканизации // *Каучук и резина*. – 2020. – Т. 79, № 1. – С. 28-31.
8. СССР, МПК G01N 33/44. Способ оценки распределения модификатора в смесях частично совместимых полимеров: № 3225049: заявл. 24.12.1980 : опубл. 07.06.1982 / Ю. Ф. Шутилин.
9. Shutilin, Y. F. Relaxational-kinetic aspects of the structure and properties of elastomers and their blends / Y. F. Shutilin // *Polymer Science U.S.S.R.* – 1987. – Vol. 29, No. 8. – P. 1773-1780. – DOI 10.1016/0032-3950(87)90044-X.

References

1. Sokolova M. D., Shadrinov N. V., Davydova M. L. [et al.] Elastomeric sealing materials for operation in the cold climate of Russia // *Rubber and rubber*. – 2018. – Vol. 77, No. 6. - pp. 402-409.
2. Chaikun A.M., Eliseev O. A., Naumov I. S., Venediktova M. A. Features of building formulations for frost-resistant rubbers // *Aviation materials and technologies*. – 2013. – № 3(28). – Pp. 53-55.
3. Mukhin V. V., Petrova N. N., Lazareva N. N. [et al.] Influence of composition and manufacturing technology of compositions on the structure and properties of frost-resistant rubbers based on mixtures of polar and non-polar rubbers // *Natural resources of the Arctic and The Subarctic*. - 2023. – Vol. 28, No. 2. – pp. 346-357. – DOI 10.31242/2618-9712-2023-28-2-346-357.
4. Shershnev V.A. The development of ideas about the role of activators of sulfur vulcanization of hydrogen elastomers. Part 1 // *Rubber and rubber*. 2012. No. 1. p. 31.

5. Kablov V. F., Novopoltseva O. M., Spiridonova M. P., Kryukova D. A. Rubbers with special properties [Electronic resource] / VPI (branch) FGBOU VO VolgSTU - Volzhsky, 2020. – Access mode <http://lib.volpi.ru>.

6. Karmanova O. V., Kalmykov V. V. Features of vulcanizate structure formation // Condensed media and interphase boundaries. 2006. Vol. 8, No. 2. pp. 112-116.

7. Karmanova O. V., Tikhomirov S. G., Popova L. V., Fatneva A. Yu. Investigation of the properties of rubbers in the presence of a composite vulcanization activator // Rubber and rubber. – 2020. – Vol. 79, No. 1. – pp. 28-31.

8. USSR, IPC G01N 33/44. Method for estimating the distribution of the modifier in mixtures of chemically compatible polymers: No. 3225049: application. 12/24/1980 : publ. 06/07/1982 / Yu. F. Shulin.

9. Shutilin, Y. F. Relaxational-kinetic aspects of the structure and properties of elastomers and their blends / Y. F. Shutilin // Polymer Science U.S.S.R. – 1987. – Vol. 29, No. 8. – P. 1773-1780. – DOI 10.1016/0032-3950(87)90044-X.

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
Шутилин Юрий Федорович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры технологии органических соединений и переработки полимеров, shurf7@mail.ru Researcher ID Z-1120-2018 Scopus Autor ID 6603220875 РИНЦ Autor ID 249710

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 Victorovna	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
Shutilin Yuri Fedorovich	DSc, professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Professor of the Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, shurf7@mail.ru Researcher ID Z-1120-2018 Scopus Autor ID 6603220875 РИНЦ Autor ID 249710

статья поступила в редакцию
06.09.2024

одобрена после рецензирования
13.09.2024

принята к публикации
26.09.2024

the article was submitted
06.09.2024

approved after reviewing
13.09.2024

accepted for publication
26.09.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕЗИН НА ОСНОВЕ БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНЫХ КАУЧУКОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ КОМПЛЕКСНОГО АКТИВАТОРА ВУЛКАНИЗАЦИИ

Ольга Викторовна Карманова 	1	karolga@mail.ru
Александр Александрович Голякевич	1	sasha4292@yandex.ru
Анастасия Борисовна Благина	1	ricebun@yandex.ru
Елизавета Алексеевна Хромина	1	yelizaveta.khromina@mail.ru

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, проспект Революции, д. 19, Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Исследовано влияние нового комплексного активатора вулканизации на упруго-прочностные свойства и стойкость к набуханию резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков с целью улучшения технических свойств резиновых изделий, эксплуатируемых в агрессивных средах. В качестве полимерной основы в рецептуре маслобензостойких резин применяли бутадиен-нитрильные каучуки марок БНКС-40АСМ, SKN-26ПВХ-30 и SKN-2665, в составе серно-ускорительной вулканизирующей группы вместо оксида цинка и стеариновой кислоты использовали новые активаторы вулканизации серии Вулкатив С-1. Результаты исследований показали, что применение новых активаторов вулканизации, в том числе в пониженных дозировках обеспечивает требуемый уровень упруго-прочностных свойств резин и более высокую плотность поперечных связей. Увеличение плотности поперечного сшивания обусловило улучшение ряда эксплуатационных показателей резин, например, снижение степени набухания в углеводородной среде при сохранении эластических свойств. Установлено, что лучший комплекс свойств достигается при использовании 3-4 мас.ч. нового активатора вулканизации в рецептуре резин на основе бутадиен-нитрильного каучука марки БНКС-40АСМ. Показано, что в рецептуре маслобензостойких резин комплексный активатор вулканизации Вулкатив С-1 может заменить цинковые белила и стеариновую кислоту.

Ключевые слова: комплексный активатор вулканизации, оксид цинка, резина, маслобензостойкость, упруго-прочностные свойства, набухание.

Для цитирования: Карманова О. В., Голякевич А. А., Благина А. Б., Хромина Е. А. Исследование свойств резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков при введении комплексного активатора вулканизации // Инженерные технологии. 2024. № 3 (7). С. 78-84.

Original article

PROPERTIES OF THE RUBBERS BASED ON NITRILE-BUTADIENE RUBBERS WITH A COMPLEX VULCANISATION ACTIVATOR

Olga V. Karmanova 	1	karolga@mail.ru
Alexander A. Golyakevich	1	sasha4292@yandex.ru
Anastasia B. Blagina	1	ricebun@yandex.ru
Elizaveta A. Khromina	1	yelizaveta.khromina@mail.ru

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

Abstract. The effect of a complex vulcanization activator on the elastic-strength properties, as well as the resistance to swelling of rubbers based on butadiene-nitrile rubbers was studied. The purpose of this is to improve the technical properties of rubber products used in aggressive environments. Butadiene-nitrile rubbers of the BNKS-40, SKN-26PVC-30 and SKN-2665 brands were chosen as the polymer base of oil-resistant rubbers. The vulcanizing group included sulfur, vulcanization accelerators, and vulcanization activators - zinc white and stearic acid, or new vulcanization activators of the Vulkativ S-1 were used instead of them. During the studies, it was found that the use of the new vulcanization activator, including in reduced dosages, provides the required level of elastic-strength properties of rubbers and a higher density of cross-links. With the increase in cross-linking density, a number of operational indicators of rubbers were improved, for example, the degree of swelling in a hydrocarbon medium was reduced while maintaining elastic properties. It was shown that the best set of properties is achieved when using a new vulcanization activator in the formulation of rubbers based on SKN-26PVC-30 in an amount of 4-5 parts by weight per 100 parts by weight of rubber. The feasibility of replacing zinc oxide and stearic acid with the product Vulkative C-1 in the formulation of oil-resistant rubbers has been proven.

Keywords: complex vulcanization activator, zinc oxide, oil and petrol resistant rubber, elastic strength properties, swelling.

For citation: Karmanova O. V., Golyakevich A. A., Blagina A. B., Khromina E. A. Properties of the rubbers based on nitrile-butadiene rubbers with a complex vulcanisation activator. *Ingeneryne tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (3 (7)): 78-84. (In Russ.).

Введение

Резинотехнические изделия используются во всех отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию прочностных и эластических свойств. Благодаря высокой эластичности резины применяют для герметизации и уплотнения различных соединений, демпфирования механических воздействий, транспортировки различных сред в узлах и механизмах автомобильной, авиационной, нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности [1]. Широкое применение получили маслобензостойкие резины. Изделия из них являются устойчивыми к непрерывному или периодическому воздействию агрессивных сред: топлив, минеральных масел, жиров и др. В частности, изделия из таких резин используют в качестве уплотнителей между трущимися металлическими поверхностями в масляных и бензиновых средах, которые обеспечивают надёжную герметизацию [2-3].

В настоящее время для изготовления маслобензостойких резинотехнических изделий широко применяются бутадиен-нитрильные каучуки (БНК), при этом часто используются вулканизирующие группы, содержащие серу, ускорители и активаторы вулканизации [4-5]. Свойства бутадиен-нитрильного каучука, являющегося продуктом сополимеризации бутадиена и нитрила акриловой кислоты (НАК) зависят от содержания последнего и чем выше содержание НАК в полимере, тем выше его устойчивость к действию масел и топлив [6]. Это обусловлено увеличением межмолекулярного взаимодействия между макромолекулами в присутствии НАК, что приводит к повышению плотности, уменьшению растворимости в растворителях ароматического ряда и повышению стойкости к набуханию в алифатических углеводородах. Скорость вулканизации возрастает с увеличением содержания связанного НАК [7]. В рецептурах РТИ на основе БНК в качестве ускорителей серной вулканизации чаще всего применяют тетраметилтиурамдисульфид (ТМТД), 2-меркаптобензотиазол (МБТ), ди(2-бензотиазол)дисульфид (ДБТД) и их комбинации, при этом отношение содержания серы к содержанию ускорителя ниже, чем в рецептурах с изопреновым или бутадиен-стирольным каучуками. Активаторы вулканизации, которые применяются совместно с органическими

ускорителями вулканизации, способствуют формированию оптимальных действительных агентов вулканизации в ходе сшивания каучука, а также связывают продукты распада ускорителей, в итоге обуславливают улучшение физико-механических свойств резин благодаря образованию пространственной структуры с повышенной частотой поперечных связей [8]. Роль активаторов вулканизации выполняют оксид цинка и стеариновая кислота. В серных вулканизирующих системах в качестве активатора обычно применяются цинковые белила марки БЦОМ.

В данной работе исследовалась возможность улучшения эксплуатационных свойств маслобензостойких резин путём замены в рецептуре резин цинковых белил и стеариновой кислоты на комплексный активатор вулканизации с содержанием основного вещества в пересчете на оксид цинка ~30 % мас. Важность применения комплексного активатора вулканизации обусловлена также снижением содержания оксида цинка в рецептурах резин, поскольку применение цинковых белил влечет за собой значительный риск для окружающей среды на всем протяжении жизненного цикла резиновых изделий: загрязнение рабочей зоны – пыление при дозировании и резиносмещении, во время эксплуатации - износ резин и попадание резиновой пыли в почву, а также в постэксплуатационном периоде - на полигонах хранения отходов, когда происходит вымывание ионов цинка из резин и его попадание в грунтовые воды. При построении рецептур резиновых изделий в настоящее время нет возможности полностью отказаться от использования оксида цинка. Замена цинковых белил на другие, более безопасные аналоги без ухудшения физико-механических показателей резин является проблемой современного рецептуростроения эластомеров. Поэтому разработка активаторов вулканизации, обеспечивающих снижение содержания оксида цинка в резинах и позволяющих сохранить технические свойства резин является актуальной.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования в данной работе являлись резиновые смеси на основе бутадиен-нитрильных каучуков марок БНКС-40, СКН-26ПВХ-30 и СКН-2665 (производитель ОАО «Красноярский завод синтетического каучука») согласно рецептуре, приведённой в

таблице 1. В опытных резинах заменяли активаторы вулканизации цинковые белила и стеариновую кислоту на комплексный активатор вулканизации марок Вулкатив С-1 и Вулкатив С-1М (производитель ООО «Совтех», г. Воро-

неж) в эквивалентной дозировке 4 мас.ч. на 100 мас.ч. каучука (шифр образца В-4) и пониженной дозировке 3 мас.ч. (В-3).

Таблица 1. Рецептуры резиновых смесей на основе бутадиен-нитрильных каучуков

Table 1. Formulations of rubber compounds based on butadiene-nitrile rubbers

Наименование компонентов / Name of components	Содержание, мас.ч. / Content, phr		
	Эталон / Rreference	Опытные / Experienced	
		В-3 / V-3	В-4 / V-4
Каучук (БНКС-40АМН или СКН-26ПВХ-30, или СКН-2665/ Rubber BNKS-40AMN or NBR-26PVC-30, or NBR-2665)	100,0	100,0	100,0
Сера / Sulfur	2,2	2,2	2,2
Тиазол 2 МБС / Thiazole 2 MBS	1,7	1,7	1,8
Цинковые белила / Zinc oxide	3,0	3,0	3,0
Стеариновая кислота / Stearic acid	1,0	1,0	1,0
Вулкатив С-1 или Вулкатив С-1М / Vulkativ S-1 or Vulkativ S-1M	-	4,0	3,0
Диафен ФП / Diafen PP	1,0	1,0	1,0
Параоксинеозон / Paraoxineozone	1,0	1,0	1,0
Фталевый ангидрид / phthalic anhydride	0,3	0,3	0,3
Технический углерод N550 / Carbon black N550	70,0	70,0	70,0
Дибутилфталат / Dibutylphthalate	34,0	34,0	34,0
Мел МТД-1 / Calcium carbonate MTD-1	35,0	35,0	35,0

Резиновые смеси изготавливали в лабораторном микросмесителе РС-0,1 начальная температура составляла 65°C, время цикла - 12 минут. Листование резиновых смесей осуществляли на лабораторных вальцах ЛБ 320-160/160. Вулканизацию проводили в электрообогреваемом прессе при температуре 160°C в течение 15 минут. Исследование свойств вулканизатов осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 54553-2019. Стойкость к действию агрессивных сред оценивали в соответствии с ГОСТ 9.030-74.

Результаты исследования и их обсуждение

Комплексные активаторы вулканизации серии Вулкатив в виде непылящего порошка содержат в своем составе оксид цинка и стеарат цинка, синтезированный на поверхности инертного носителя [9]. При изготовлении резиновых смесей, проявляя свойства поверхностно-активного вещества, данный продукт может выполнять роль диспергатора компонентов, обеспечивая равномерное распределение не только компонентов вулканизирующей

группы, но и других порошкообразных ингредиентов.

На первом этапе определены физико-химические свойства продуктов Вулкатив С-1 и Вулкатив С-1М, соответственно: содержание золы составило 70,5 и 71,0 % мас.; потери массы при прокаливании – 0,23 % и 0,22 %; массовая доля соединений цинка в пересчете на оксид цинка – 30,1 и 33,5 % .

Методом ситового анализа в соответствии с ГОСТ 27562-87 определен фракционный состав продукта и установлено, что размер частиц опытного активатора вулканизации лежит в диапазоне 0,05÷1,0 мм и преимущественно составил 0,1÷0,2 мм (рисунок 1).

С использованием комплексных активаторов вулканизации Вулкатив С-1 и Вулкатив С-1М изготовлены резиновые смеси на основе трех марок бутадиен-нитрильных каучуков. В ходе смешения отмечено, что по сравнению с эталонными образцами опытные резиновые смеси характеризовались лучшими технологическими свойствами.

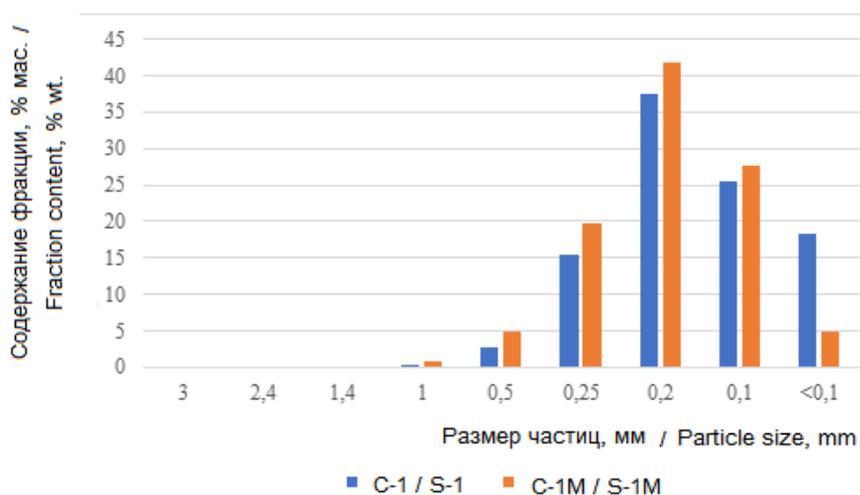


Рисунок 1. Фракционный состав опытных активаторов вулканизации Вулкатив С-1 и Вулкатив С-1М

Figure 1. Fractional composition of vulcanisation activators Vulkativ S-1 and Vulkativ S-1M

На следующем этапе работы проведена оценка упруго-прочностных свойств вулканизатов, результаты испытаний приведены в таблице 2. Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод, что резины на основе каучука с большим содержанием НАК характеризовались большими значениями модулей при растяжении на 100, 200 и 300 %, а также прочностью и относительным удлинением при разрыве. Применение в составе вулканизирующей группы опытных активаторов вулканизации вместо оксида цинка и стеариновой кислоты позволяет получить резины упруго-

прочностными характеристиками на уровне эталона или превышающими таковые даже при сниженной дозировке (3 мас.ч.).

Плотность пространственной сетки вулканизатов оценивали методом равновесного набухания образцов в толуоле и рассчитывали с использованием уравнения Флори-Ренера. Установлено, что вулканизирующие системы на основе комплексного активатора вулканизации обуславливают более высокие значения концентрации поперечных связей для всех исследуемых каучуков.

Таблица 2. Физико-механические показатели стандартных и опытных резин

Table 2. Physical and mechanical parameters of standard and experimental rubbers

Наименование показателей / Name of indicators	Шифр образца / Sample code					
	БНКС-40АМН / BNKS-40AMN		СКН-26ПВХ-30 / NBR-26PVC-30		СКН-2665 / NBR-2665	
	Эталон / Rreference	С-1 / S-1	Эталон / Rreference	С-1 / S-1	Эталон / Rreference	С-1 / S-1
Условное напряжение при удлинении на 100%, МПа / Modulus at 100 %, MPa	2,9	3,3	4,6	5,3	2,9	3,1
Условное напряжение при удлинении на 300%, МПа / Modulus at 300 %, MPa	10,0	9,8	8,5	8,5	7,4	8,9
Условная прочность при растяжении, МПа / Tensile strength, MPa	12,8	13,0	8,7	8,9	8,1	10,2
Относительное удлинение при разрыве, % / Elongation at break, %	427	463	317	315	350	335
Относительное остаточное удлинение, % / Residual elongation, %	15	16	23	21	26	19

После экспозиции образцов в стандартной жидкости СЖР-1 значительного снижения прочностных показателей резин не отмечено. Из данных таблицы 3 видно, что у резин на основе более полярного каучука СКН-40АСМ стойкость вулканизатов к набуханию, оцененная по прочности при растяжении меньше, чем у резин на основе СКН-26ПВХ-30 и СКН-2665, а показатель изменения относительно удлинения при разрыве у данного образца больше. При введении опытного активатора вулкани-

зации стойкость к агрессивной среде вулканизатов остается на уровне эталона у образцов СКН-40 АСМ и превосходит образцы сравнения на основе СКН-26ПВХ-30 и СКН-2665, что свидетельствует о формировании в его присутствии более эффективной пространственной сетки.

Аналогичные зависимости изменения свойств получены для резин при использовании активатора вулканизации Вулктив С-1М.

Таблица 3. Изменение физико-механических показателей резин после воздействия агрессивной среды (72 ч.)

Table 3. Change in physical and mechanical properties of rubbers after exposure to oil and petrol mixture (72 hours)

Наименование показателей / Name of indicators	Шифр образца / Sample code					
	БНКС-40АМН / BNKS-40AMN		СКН-26ПВХ-30 / NBR-26PVC-30		СКН-2665 / NBR-2665	
	Эталон / Rreference	С-1 / S-1	Эталон / Rreference	С-1 / S-1	Эталон / Rreference	С-1 / S-1
Показатель изменения условной прочности при растяжении, % / Change in tensile strength, %	-2,3	-2,3	-3,7	-2,9	-7,0	-5,4
Показатель изменения относительного удлинения при разрыве, % / Change in elongation at break, %	-20,7	-20,3	-10,5	-6,5	-9,2	-9,2

Таким образом, в ходе исследования упруго-прочностных свойств и стойкости к агрессивной среде резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков с разным содержанием НАК, полученных с применением комплексных активаторов вулканизации Вулктив С-1 и Вулктив С-1М показана целесообразность замены на данные продукты цинковых белил и стеариновой кислоты в рецептурах резин, предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах.

Выводы

Проведены исследования физико-химических свойств и гранулометрического состава комплексных активаторов вулканизации, предназначенных для замены цинковых белил и стеариновой кислоты в рецептуре резин на основе бутадиен-нитрильных каучуков. При

изготовлении резиновых смесей уплотнительного назначения, предназначенных для эксплуатации в среде масел и топлив установлено, что опытные продукты способствовали улучшению диспергирования порошкообразных компонентов и обеспечили требуемое качество заготовок. По результатам исследования упруго-прочностных свойств резин можно сделать вывод о положительном влиянии комплексных активаторов вулканизации на формирование пространственно сшитой структуры эластомера, способной выдерживать значительные механические напряжения и воздействие агрессивной среды. Следует отметить, что применение продуктов Вулктив С-1 и Вулктив С-1М позволит обеспечить снижение содержания оксида цинка в резиновых изделиях, что положительно скажется на экологических показателях.

Литература

1. Шутилин Ю.Ф. Справочное пособие по свойствам и применению эластомеров. Воронеж: ВГТА, 2003. 871 с.
2. Марк Дж., Эрман Б., Эйрич Ф. Каучук и резина. Наука и технологии. Долгопрудный: Изд. Дом Интеллект. 2011. 768 с.
3. Спиридонов И.С., Ушмарин Н.Ф., Сандалов С.И., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И. Влияние функциональных ингредиентов на технологические свойства резиновых смесей для уплотнительных элементов. Бутлеров. сообщ. 2017. Т. 51. № 7. С. 132-136.
4. Каблов В. Ф., Новопольцева О. М., Спиридонова М. П., Крюкова Д. А. Резины со специальными свойствами [Электронный ресурс]. ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО ВолгТУ. Волжский, 2022. – Режим доступа <http://lib.volpi.ru>.

5. Шершнев В.А. Развитие представлений о роли активаторов серной вулканизации углеродородных эластомеров. Часть 1 // Каучук и резина. 2012. № 1. С. 31.
6. Папков В.Н., Гусев Ю.К., Ривин Э.М. и др. Бутадиен-нитрильные каучуки. Синтез и свойства / Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГУИТ». 2014. 218 с.
7. Гришин Б.С. Материалы резиновой промышленности (информационно-аналитическая база данных): монография. Ч.1. Казань, КГТУ, 2010. 506 С.
8. Glebova Y., Severin N., Rabe J.P., Shershnev V. Nitrogen-doped graphene as an alternative to ecotoxic zinc oxide in rubbers // Journal of Applied Polymer Science. 2018. V. 135. N 17. P. 46116.
9. Карманова, О., Тихомиров, С., Попова, Л. и Фатнева, А. 2020. Исследование свойств резин в присутствии композиционного активатора вулканизации. Журнал «Каучук и резина». 2020. Т. 79, №1. С. 28–31.

References

1. Shutilin Yu.F. Reference manual on the properties and application of elastomers. Voronezh: VGTA, 2003. 871 p.
2. Mark J., Ehrman B., Eirich F. Rubber and rubber. Science and technology. Dolgoprudny: Ed. House of Intellect. 2011. 768 p.
3. Spiridonov I.S., Ushmarin N.F., Sandalov S.I., Egorov E.N., Koltsov N.I. The effect of functional ingredients on the technological properties of rubber compounds for sealing elements. Butlers. the message. 2017. Vol. 51. No. 7. pp. 132-136.
4. Kablov V. F., Novopol'tseva O. M., Spiridonova M. P., Kryukova D. A. Rubbers with special properties [Electronic resource]. VPI (branch) of FGBOU IN VolgTU. Volzhsky, 2022. – Access mode <http://lib.volpi.ru> .
5. Shershnev V.A. The development of ideas about the role of activators of sulfur vulcanization of hydrogen elastomers. Part 1 // Rubber and rubber. 2012. No. 1. p. 31.
6. Papkov V.N., Gusev Yu.K., Rivin E.M. et al. Butadiene-nitrile rubbers. Synthesis and properties / Voronezh: FGBOU VPO "VGUIT". 2014. 218 p.
7. Grishin B.S. Materials of the rubber industry (information and analytical database): monograph. Part 1. Kazan, KSTU, 2010. 506 P.
8. Glebova Y., Severin N., Rabe J.P., Shershnev V. Nitrogen-doped graphene as an alternative to ecotoxic zinc oxide in rubbers // Journal of Applied Polymer Science. 2018. V. 135. N 17. P. 46116.
9. Karmanova, O., Tikhomirov, S., Popova, L. and Fatneva, A. 2020. Investigation of the properties of rubbers in the presence of a composite vulcanization activator. The magazine "Rubber and rubber". 2020. Vol. 79, No. 1. pp. 28-31.

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
Голякевич А лександр Алек- сандрович	аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных техноло- гий», кафедра «Технологии органических соединений и переработки полимеров», sasha4292@yandex.ru SPIN-код 3191-1767
Благина Анастасия Борисовна	студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных техноло- гий», кафедра «Технологии органических соединений и переработки полимеров», ricebun@yandex.ru ORCID 0009-0000-4003-9661
Хромина Елизавета Алексеевна	студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных техноло- гий», кафедра «Технологии органических соединений и переработки полимеров», yelizaveta.khromina@mail.ru ORCID0009-0004-3190-1722

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 Victorovna	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
Golyakevich Alexander Alexandrovich	graduate student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, sasha4292@yandex.ru SPIN-code 3191-1767
Blagina Anastasia Borisovna	student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, ricebun@yandex.ru ORCID 0009-0000-4003-9661
Khromina Elizaveta Alekseevna	student, Voronezh State University of Engineering Technologies, Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, yelizaveta.khromina@mail.ru ORCID0009-0004-3190-1722

статья поступила в редакцию 04.09.2024	одобрена после рецензирования 14.09.2024	принята к публикации 27.09.2024
the article was submitted 04.09.2024	approved after reviewing 14.09.2024	accepted for publication 27.09.2024

