

ISSN 2949-6241

e-ISSN 2949-6233

Инженерные Технологии



№ 4 (8) 2024

16+

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (8), 2024

16+

ENGINEERING TECHNOLOGIES
SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

№ 4 (8), 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 26.12.2024.

Выход в свет: 27.12.2024.

Формат 70x100 1/8

Усл. печ. л. 11,75. 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 26.12.2024.

The publication: 27.12.2024.

Format 70 x 100 1/8

Usl. pech. l. 11,75. Edition of 100 copies. Order No.

Price - free

© FSBEI HE

«Voronezh State University of
Engineering and Technology»,
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и телекоммуникации

| | |
|---|----|
| МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КЛАСТЕРИЗАЦИИ <i>Филатов А. С., Николаева С. В.</i> | 15 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОГО ПАРАМЕТРА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ГИБКИ ТРУБ ПРОТАЛКИВАНИЕМ В КРИВОЛИНЕЙНУЮ ФИЛЬЕРУ МАТРИЦЫ <i>Егоров В. Г., Васечкин М. А., Давыдов О. Ю., Кудрявцев Г. В., Прибытков А. В.</i> | 22 |
| ОСОБЕННОСТИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАКАЗАМИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОПЕРАТОРА <i>Исабекова О. А., Дудин В. В.</i> | 31 |
| СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММ «1С: ЗАРПЛАТА И УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ 8» И «БОСС-КАДРОВИК» <i>Косогоров К. С.</i> | 38 |
| АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМОВ КОНСЕНСУСА PROOF OF STAKE И PROOF OF WORK <i>Суцев Р. Д.</i> | 43 |
| ГЕНЕАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ <i>Хонькин С. Н., Суцев Р. Д.</i> | 49 |
| РАСПРЕДЕЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕДКИХ СОБЫТИЙ ДЛЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ <i>Бескин А. Л., Игонина Т. Р., Кесельман В. М., Параскевопуло О. Р.</i> | 55 |

Химические технологии, науки о материалах

| | |
|---|----|
| ВЛИЯНИЕ НА РАСХОД ХЛОРИДА НАТРИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЕГО ГОМОГЕНИЗАЦИИ В БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОМ ЛАТЕКСЕ <i>Мякишева А. В., Пугачева И. Н., Никулин С. С.</i> | 66 |
| ВЫДЕЛЕНИЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ОТРАБОТАННОГО РАСТВОРА ТРАВЛЕНИЯ СТАЛИ МЕТОДОМ ДИАЛИЗА С АНИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ МА-41 <i>Козадерова О. А., Чернова В. Ю.</i> | 71 |
| УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БУТИЛКАУЧУКОВОГО МАСТИЧНОГО ПОКРЫТИЯ <i>Седых В. А., Патенко Е. М., Королева Е. В.</i> | 78 |

CONTENTS

Information technology and telecommunications

| | |
|---|----|
| METHODS FOR PRE-PROCESSING SPECTRA TO IMPROVE THEIR SUBSEQUENT VISUALIZATION AND CLUSTERING <i>Filatov A. S., Nikolaeva S. V.</i> | 15 |
| DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETER OF AUTOMATION OF THE PROCESS OF PIPE BENDING BY PUSHING INTO A CURVILINEAR DIE OF A MATRIX <i>Egorov V. G., Vasechkin M. A., Davydov O. Yu., Kudryavtsev G. V., Pribytkov A. V.</i> | 22 |
| FEATURES OF SUBJECT-ORIENTED DESIGN OF TELECOMMUNICATION ORDER MANAGEMENT SYSTEMS <i>Isabekova O. A., Dudin V. V.</i> | 31 |
| COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROGRAMS "1C: SALARY AND PERSONNEL MANAGEMENT 8" AND BOSS HR <i>Kosogorov. K. S.</i> | 38 |
| ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF PROOF OF STAYING AND PROOF OF WORK CONSENSUS ALGORITHMS <i>Sushchev R. D.</i> | 43 |
| GENEALOGICAL ANALYSIS OF DOMESTIC OPERATING SYSTEMS <i>Khonkin S. N., Sushchev R. D.</i> | 49 |
| DISTRIBUTED SIMULATION OF RARE EVENTS FOR FAULT-TOLERANT SYSTEMS <i>Beskin A. L., Igonina T. R., Keselman V. M., Paraskevopulo O. R.</i> | 55 |

Chemical technologies, materials sciences

| | |
|---|----|
| DEPENDENCE OF THE AGGREGATE STABILITY OF LATEX BUTADIENE-NITRILE RUBBER ON THE TIME OF CONTACT WITH THE COAGULATING AGENT <i>Myakisheva A. V., Pugacheva I. N., Nikulin S. S.</i> | 66 |
| ISOLATION OF HYDROCHLORIC ACID FROM SPENT STEEL ETCHING SOLUTION BY DIALYSIS WITH ANION EXCHANGE MEMBRANE MA-41 <i>Kozaderova O. A., Chernova V. Yu.</i> | 71 |
| IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING BUTYL RUBBER MASTIC COATING <i>Sedykh V. A., Patenko E. M., Koroleva E. V.</i> | 78 |

Научная статья

УДК 004.02

**МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕКТРОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И КЛАСТЕРИЗАЦИИ**

Александр Сергеевич Филатов¹ nelolpp@gmail.com
Светлана Владимировна Николаева^{1, 2} snikolaeva@yandex.ru

¹МИРЭА - Российский технологический университет, проспект Вернадского, 78, Москва, 119454, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Красноказарменная ул., 17, стр. 3, Москва, 111250, Россия

Аннотация. Проведена оценка влияния различных методов предварительной обработки спектров на их визуализацию и кластеризацию. Оценка точности кластеризации с помощью алгоритма K-means показала, что предварительная обработка данных улучшает результаты, повышая точность до 97,3 % по сравнению с 66,9 % на необработанных данных.

Ключевые слова: анализ, кластер, кластерный анализ, кластеризация, спектр, оценка, визуальная оценка, визуализация, метрика, данные, обработка данных, алгоритм.

Для цитирования: Филатов А. С., Николаева С. В. Методы предварительной обработки спектров для улучшения их последующей визуализации и кластеризации // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 15-21.

Original article

**METHODS FOR PRE-PROCESSING SPECTRA TO IMPROVE THEIR SUBSEQUENT
VISUALIZATION AND CLUSTERING**

Aleksandr S. Filatov¹ nelolpp@gmail.com
Svetlana V. Nikolaeva^{1, 2} snikolaeva@yandex.ru

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

²National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Krasnokazarmennaya st., 17, build. 3, Moscow, 111250, Russia

Annotation. The impact of different methods of spectrum preprocessing on their visualization and clustering was evaluated. Evaluating clustering accuracy with the K-means algorithm showed that preprocessing the data improved results, improving accuracy to 97.3% compared to 66.9% on raw data.

Keywords: analysis, cluster, cluster analysis, clustering, spectrum, evaluation, visual evaluation, visualization, metric, data, data processing, algorithm.

For citation: Filatov A. S., Nikolaeva S. V. Methods for pre-processing spectra to improve their subsequent visualization and clustering. *Ingenerynye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 15-21. (In Russ.).

Введение

С ростом объёма информации в различных сферах – от анализа социальных сетей до контроля качества химического продукта – обработка данных, в том числе спектров, характеризующихся множеством измерений, каждое из которых отражает определённую характеристику или атрибут объекта, является важной актуальной задачей [1, 2]. Однако высокий уровень размерности данных создаёт множество проблем для анализа и эффективной обработки, в связи с чем алгоритмы снижения размерности становятся важным инструментом

для подготовки данных к их кластеризации.

Кластеризация представляет собой метод группировки объектов, в котором алгоритмы распределяют данные по кластерам на основе схожих характеристик. Однако с ростом размерности данных методы кластеризации сталкиваются с рядом проблем [3].

1. При увеличении числа измерений данные становятся разреженными, что затрудняет их кластеризацию. Чем больше измерений, тем менее выражены различия между объектами, что приводит к ухудшению точности алгоритмов.

2. Высокая размерность требует зна-

чительных ресурсов для обработки и анализа данных. Алгоритмы кластеризации, особенно те, которые основываются на вычислении расстояния между объектами, становятся менее эффективными.

3. С увеличением размерности данные могут содержать ненужные или малоинформативные признаки, которые ухудшают качество кластеров, делая их менее устойчивыми и точными.

Снижение размерности данных позволяет упростить их структуру, сохраняя при этом наиболее важную информацию и улучшая условия для кластеризации [4, 5].

Материал и методы исследования

Рассмотрим применение одного из наиболее популярных алгоритмов снижения размерности – t-SNE (t-Distributed Stochastic

$$R[k] = grad(x)(k) = \begin{cases} (1) - x(0), & k = 0, \\ \frac{x(k+1) - x(k-1)}{2}, & k = 1, 2, \dots, N-2, \\ x(N-1) - x(N-2), & k = N-1, \end{cases} \quad (2)$$

где R – вектор, подаваемый на вход алгоритма снижения размерности; A – исходный вектор значений спектра; k – индекс элемента вектора; N – длина вектора.

Исследуем спектры бензина [4, 7]. Проведём кластерный анализ полученных данных с помощью алгоритма кластеризации K-means [8]. Результаты кластеризации сравним с исходными данными с помощью скорректированного индекса Рэнда [9 – 11].

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунках 1 – 3 представлены результаты визуализации данных с помощью алго-

Neighbor Embedding). Этот алгоритм особенно эффективен для визуализации и кластеризации данных высокой размерности, таких как изображение или текст: t-SNE снижает размерность, сохраняя локальные структуры данных, что позволяет идентифицировать группы и паттерны, которые сложно заметить в исходных данных [6, 7].

Предварительную обработку данных проведём двумя методами:

1) путём вычисления разницы между соседними элементами в спектре

$$R[k] = \Delta A(k) = A[k+1] - A[k], \quad (1)$$

$$k = 0, 2, \dots, N-1;$$

2) путём вычисления градиента дискретного вектора спектра с использованием конечных разностей

ритма t-SNE с использованием метрики Брея-Кертиса. Зрительно оценим, насколько близко друг к другу находятся точки, визуализирующие данные из одной и той же группы, окрашенные в один цвет.

На рисунке 1 представлена визуализация необработанных спектров, из которого видно, что алгоритм перемешал точки разных цветов: синие точки примкнули к зелёным и фиолетовым, в то время как основная их часть располагается в другом месте. Однако кластер жёлтых точек был распознан и расположен чётко в одном месте.

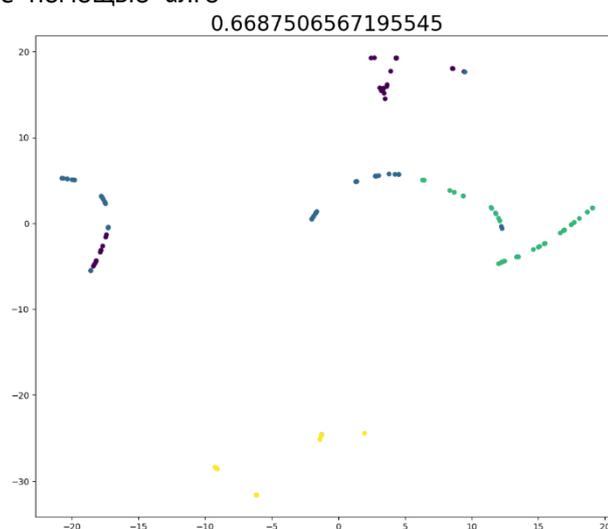


Рисунок 1. Визуальная оценка работы алгоритма без предварительной обработки данных (использование метрики Брея-Кертиса)

Figure 1. Visual assessment of the algorithm's performance without preliminary data processing (using the Bray-Curtis metric)

На рисунке 2 представлена визуализация данных, модифицированных первым описанным методом (формула (1)), на рисунке 3 – вторым методом (формула (2)).

При работе с предварительно обработанными данными проблем перемешивания кла-

стеров не возникло, что положительно сказалось на возможности выполнения кластерного анализа этих данных. Визуализации модифицированных данных идентичны, нельзя выделить какой-то из этих методов.

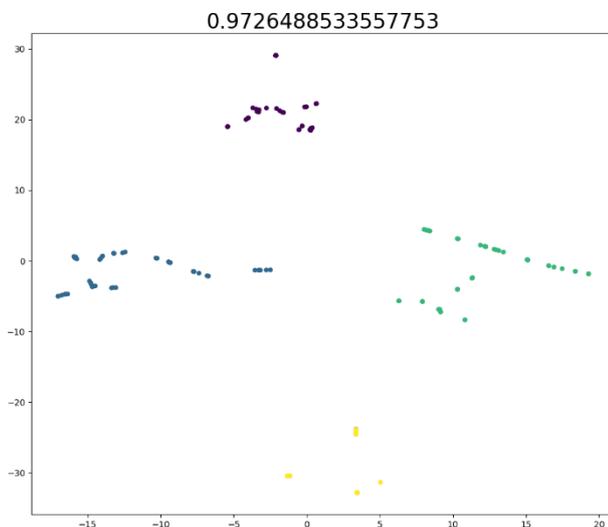


Рисунок 2. Визуальная оценка работы алгоритма с обработкой первым методом (формула (1)) (использование метрики Брея-Кертиса)

Figure 2. Visual evaluation of the algorithm's performance with the first method of processing (formula (1)) (using the Bray-Curtis metric)

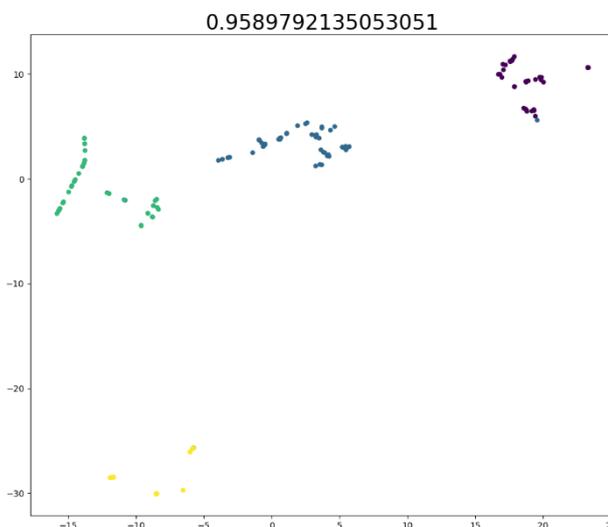


Рисунок 3. Визуальная оценка работы алгоритма с обработкой вторым методом (формула (2)) (использование метрики Брея-Кертиса)

Figure 3. Visual evaluation of the algorithm's performance with the second method of processing (formula (2)) (using the Bray-Curtis metric)

В таблице 1 представлена оценка влияния предварительной обработки данных на точность кластеризации. Применение алгоритма уменьшения размерности и его метрика сопоставлены с полученной оценкой кластеризации, которая колеблется от 0 до 1. Чем ближе к 1, тем точнее кластеризация.

Видно, что кластеризация необработанных

данных, изображённых на рисунке 1, выполнена с точностью 66,9 %, что не является удовлетворительным результатом. В то же время кластеризация тех же данных, предварительно обработанных двумя методами (рисунки 2 и 3), выполнена с точностью 97,3 % и 95,9 %. Такие результаты можно считать успешными.

Таблица 1. Оценка кластеризации

Table 1. Clustering assessment

| Без обработки | | Разность | | Градиент | |
|---------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| Точн. | Метрика | Точн. | Метрика | Точн. | Метрика |
| 0,6688 | braycurtis | 0,9726 | braycurtis | 0,9590 | braycurtis |
| 0,7624 | canberra | 0,9726 | canberra | 0,9726 | canberra |
| 0,5853 | chebyshev | 0,4797 | chebyshev | 0,4606 | chebyshev |
| 0,8302 | correlation | 0,7887 | correlation | 0,7805 | correlation |
| 0,8583 | cosine | 0,7887 | cosine | 0,7556 | cosine |
| 0,8575 | euclidean | 0,5735 | euclidean | 0,5887 | euclidean |
| 0,9726 | hamming | 0,9060 | hamming | 0,9456 | hamming |
| 0,6631 | manhattan | 0,9457 | manhattan | 0,9457 | manhattan |
| 0,8575 | minkowski | 0,5627 | minkowski | 0,5887 | minkowski |
| 0,6906 | seuclidean | 0,9462 | seuclidean | 0,9462 | seuclidean |
| 0,8575 | squeuclidean | 0,6452 | squeuclidean | 0,6245 | squeuclidean |

Анализируя полученные результаты с применением других метрик, можно увидеть, что успешная кластеризация предварительно обработанных данных достигается чаще, хотя с применением некоторых метрик ситуация может быть обратной.

На рисунках 4 – 6 изображён результат работы алгоритма над необработанными спектрами (рисунок 4), обработанными первым методом (рисунок 5) и обработанными вторым методом (рисунок 6) с использованием метри-

ки Минковского. На рисунке 4 видно, что алгоритм в целом хорошо расположил точки, хотя близко разместил кластеры с фиолетовыми и зелёными точками справа и примешал к ним часть голубых. Алгоритм кластеризации в данном случае хорошо справился с разбиением двух близко расположенных кластеров, но отнёс синие точки к зелёным, выполнив тем самым кластеризацию с точностью 85,7 %, что является неплохим результатом.

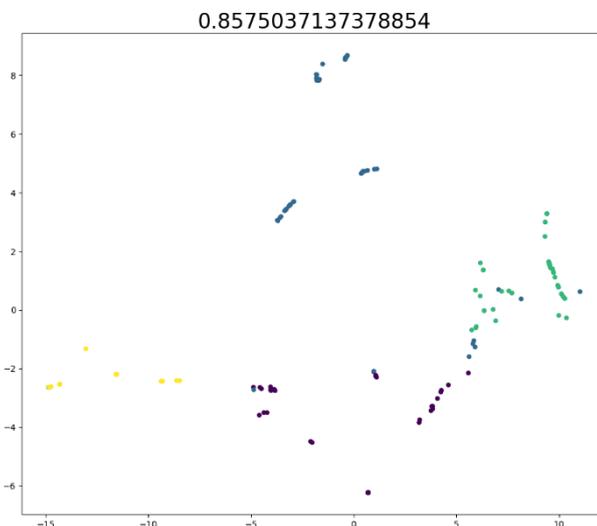


Рисунок 4. Визуальная оценка работы алгоритма без предварительной обработки данных (использование метрики Минковского)

Figure 4. Visual assessment of the algorithm's performance without preliminary data processing (using the Minkowski metric)

В случаях с обработанными данными на рисунках 5 и 6 видно, что очень много точек «отбилась» от своих кластеров. Результат выполнения кластеризации неудовлетворитель-

ный: 56 – 59 % точности. Такие результаты в очередной раз подчёркивают важность выбора метрики расстояния при решении данной задачи [7, 12].

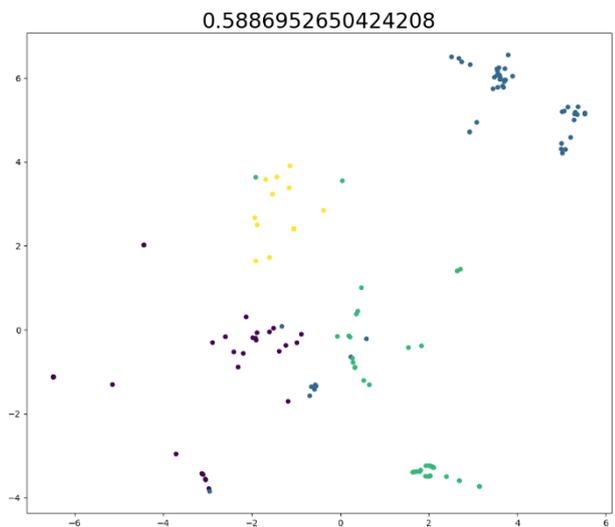


Рисунок 5. Визуальная оценка работы алгоритма с обработкой первым методом (формула (1)) (использование метрики Минковского)

Figure 5. Visual evaluation of the algorithm's performance with the first method of processing (formula (1)) (using the Minkowski metric)

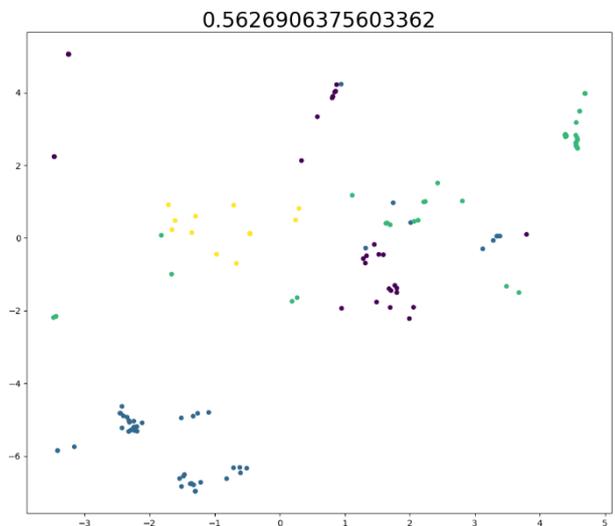


Рисунок 6. Визуальная оценка работы алгоритма с обработкой вторым методом (формула (2)) (использование метрики Минковского)

Figure 6. Visual evaluation of the algorithm's performance with the second method of processing (formula (2)) (using the Minkowski metric)

Вывод

Исследование спектров бензина подтвердило, что предварительная обработка данных и методы снижения размерности являются ключевыми инструментами для повышения точности кластеризации [13]. Так, точность

кластеризации необработанных данных составляет всего 66,9 %, тогда как обработанные данные показали значительно лучшие результаты, а именно 97,3 % и 95,9 % для двух представленных методов предварительной обработки.

Литература

1. Филатов, А. С. Алгоритмы оптимального различения обобщённых спектральных данных / А. С. Филатов, С. В. Николаева, С. А. Красников / В сборнике: Информационно-аналитические и интеллектуальные системы для производства и социальной сферы. / Сборник статей всероссийской межвузовской научно-практической конференции молодых учёных. Российский биотехнологический университет. – Курск, 2022. – С. 5-12.
2. Краснов, А. Е. Различение спектральных данных / А. Е. Краснов, С. В. Николаева, С. А. Красников, А. С. Филатов / В сборнике: Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности. / XXIII Международная конференция, XXI Международный конкурс научных и научно-

методических работ, II Международный конкурс «Нейросетевой рисунок». – Москва, 2022. – С. 65-67.

3. Махрусе, Н. Современные тенденции методов интеллектуального анализа данных: метод кластеризации / Н. Махрусе // Московский экономический журнал. – 2019. – № 6. – С. 35. – DOI 10.24411/2413-046X-2019-16034. – EDN ZPTNRR.

4. Красников, С. А. Визуализация больших данных в виде многомерных векторов на плоскость / С. А. Красников, М. А. Овчинникова, К. В. Гусев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 1. – С. 155-158. – EDN IQSAUL.

5. Чернов, Е. А. Метод сжатия и визуализации обобщённых спектральных данных объектов пищевой и химической промышленности: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Чернов Евгений Александрович, 2014. – 123 с. – EDN CIBAAI.

6. Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton. Visualizing Data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research* 9:2579-2605, 2008.

7. Филатов, А. С. Влияние выбора метрик расстояния на визуализацию данных / А. С. Филатов, С. В. Николаева, В. Н. Гельмиярова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 9. – С. 86-88.

8. Николаева, С. В. Кластеризация многомерных спектральных данных с применением алгоритма уменьшения размерности / С. В. Николаева, С. А. Красников, М. В. Сартаков, А. С. Филатов, К. В. Гусев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 10. – С. 273-277.

9. Бондарев, А. Е. Визуальный анализ кластерных структур в многомерных объёмах текстовой информации / А. Е. Бондарев, А. В. Бондаренко, В. А. Галактионов, Э. С. Клышинский // Научная визуализация. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 1-24. – EDN WHBCNT.

10. Сивоголовко, Е. В. Методы оценки качества чёткой кластеризации / Е. В. Сивоголовко // Компьютерные инструменты в образовании. – 2011. – № 4. – С. 14-31. – EDN SITILP.

11. Новикова, М. А. Обзор сведений о кластерном анализе и программных средствах обработки статистических данных / М. А. Новикова, Д. А. Ковалев // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей. Научное издание, Санкт-Петербург, 22 декабря 2022 года / Под общей редакцией Т.Ю. Коротковой, сост. М.С. Липатов, Е.Н. Лашина. – Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», 2023. – С. 169-176. – EDN YZCLGI.

12. Филатов, А. С. Метрики расстояний алгоритма снижения размерности UMAP / А. С. Филатов / В сборнике: Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности. Сборник трудов. XXVIII Международная конференция. XXVI Международный конкурс научных и научно-методических работ. Всероссийский конкурс проектов «Научное творческое сообщество». – Москва, 2024. – С. 120-122.

13. Филатов, А. С. Модуль кластеризации и анализа спектральных данных / А. С. Филатов / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024665128, 27.06.2024. Заявка от 13.06.2024.

References

1. Filatov, A. S. Algorithms for the Optimal Distinction of Generalized Spectral Data / A. S. Filatov, S. V. Nikolaeva, S. A. Krasnikov / In the collection: Information-analytical and Intellectual Systems for Production and the Social Sphere. / Collection of articles of the All-Russian intercollegiate scientific and practical conference of young scientists. Russian Biotechnological University. – Kursk, 2022. – P. 5-12.

2. Krasnov, A. E. Distinction of Spectral Data/A. E. Krasnov, S. V. Nikolaeva, S. A. Krasnikov, A. S. Filatov / In the collection: Modern Information Technologies in Education, Science and Industry. / XXIII International Conference, XXI International Competition of Scientific and Scientific and Methodological Works, II International Competition "Neural Network Drawing." – Moscow, 2022. – P. 65-67.

3. Mahruse, N. Modern trends in data mining methods: clustering method / N. Mahruse // Moscow Economic Journal. - 2019. – No. 6. – P. 35. - DOI 10.24411/2413-046X-2019-16034. – EDN ZPTNRR.

4. Krasnikov, S. A. Visualization of Big Data as Multidimensional Vectors on a Plane / S. A. Krasnikov, M. A. Ovchinnikova, K. V. Gusev // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2024. – No. 1. – P. 155-158. – EDN IQSAUL.

5. Chernov, E. A. Method of Compression and Visualization of Generalized Spectral Data of Food and Chemical Industry Objects: specialty 05.13.01 "System analysis, management and processing of information

(by industry)" : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Chernov Evgeny Aleksandro- vich, 2014. – 123 p. – EDN CIBAAI.

6. Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton. Visualizing Data Using t-SNE. Journal of Machine Learning Research 9:2579-2605, 2008.

7. Filatov, A. S. The Influence of the Choice of Distance Metrics on Data Visualization / A. S. Filatov, S. V. Nikolaeva, V. N. Gelmiyarova // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region – 2024 – № 9 – P. 86-88.

8. Nikolaeva, S.V. Clustering of Multidimensional Spectral data Using the Dimensionality Reduction Algorithm / S.V. Nikolaeva, S.A. Krasnikov, M.V. Sartakov, A.S. Filatov, K.V. Gusev // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. – 2023. – № 10. – P. 273-277.

9. Bondarev, A. E. Visual Analysis of Cluster Structures in Multidimensional Volumes of Text Infor- mation / A. E. Bondarev, A. V. Bondarenko, V. A. Galaktionov, E. S. Klyshinsky // Scientific Visualization. – 2016. – Vol. 8, No. 3. – P. 1-24. – EDN WHBCNT.

10. Sivogolovko, E. V. Methods for Assessing the Quality of Clear Clustering / E. V. Sivogolovko // Computer tools in education. – 2011. – No. 4. – P. 14-31. – EDN SITILP.

11. Novikova, M. A. Review of Information on Cluster Analysis and Software for Processing Statistical Data / M. A. Novikova, D. A. Kovalev // Power Engineering, Control and Automation: Innovative Solu- tions to Problems: Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference of students and teachers' Scientific publication, St. Petersburg, December 22, 2022 / Under the general editorship of T. Yu. Korotkova, compiled by M. S. Lipatov, E. N. Lashina. – St. Petersburg: Higher School of Technology and Power Engineering of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "St. Peters- burg State University of Industrial Technologies and Design", 2023. – P. 169-176. – EDN YZCLGI.

12. Filatov, A. S. Distance Metrics of the UMAP Dimension Reduction Algorithm /A. S. Filatov /In the collection: Modern Information Technologies in Education, Science and Industry. Collection of works. XXVIII International Conference. XXVI International Competition of Scientific and Methodological Works. All-Russian competition of projects "Scientific creative community." – Moscow, 2024. – P. 120-122.

13. Filatov, A. S. Module of Clustering and Analysis of Spectral Data /A. S. Filatov / Certificate of registration of the program for computers RU 2024665128, 27.06.2024. Request from 13.06.2024.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международ- ные идентификационные номера авторов) |
|---------------------------------|---|
| Филатов Александр Сергеевич | старший преподаватель, МИРЭА – Российский технологический университет, nelolpp@gmail.com |
| Николаева Светлана Владимировна | доктор технических наук, профессор, профессор МИРЭА – Российского технологиче- ского университета, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», snikolaeva@yandex.ru SPIN-код: 2207-3065 |

Authors information

| Last name, first name, patronymic | Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international iden- tification numbers of the authors) |
|-----------------------------------|---|
| Filatov Alexander Sergeevich | Senior Lecturer, MIREA – Russian Technological University, nelolpp@gmail.com |
| Nikolaeva Svetlana Vladimirovna | DSc, Professor, Professor of the MIREA – Russian Technological University, Professor of the National Research University "MEI", snikolaeva@yandex.ru SPIN-код: 2207-3065 |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 02.12.2024 | одобрена после рецензирования 13.12.2024 | принята к публикации 23.12.2024 |
| the article was submitted 02.12.2024 | approved after reviewing 13.12.2024 | accepted for publication 23.12.2024 |

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОГО ПАРАМЕТРА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ГИБКИ ТРУБ ПРОТАЛКИВАНИЕМ В КРИВОЛИНЕЙНУЮ ФИЛЬЕРУ МАТРИЦЫ

| | | |
|--------------------------------|---|--|
| Владислав Геннадьевич Егоров | 1 | vlad-niat@mail.ru |
| Максим Алексеевич Васечкин✉ | 1 | vmax77@mail.ru |
| Олег Юрьевич Давыдов | 1 | dav_61@mail.ru |
| Георгий Владимирович Кудрявцев | 1 | gogenaqualang1@ramble.ru |
| Алексей Викторович Прибытков | 2 | pribytkov_aleks@mail.ru |

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

²Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54 а, Воронеж, 394064, Россия

Аннотация. Одним из основных мест разрушения трубопроводных систем является разрушение по основному металлу в зоне изгиба. Изгибы большой кривизны и искажение поперечных сечений являются концентраторами напряжений и приводят к усталостным разрушениям трубопроводов при пульсирующем давлении насосов. В связи с этим одной из актуальных задач является разработка прогрессивных технологий изготовления крутоизогнутых патрубков. Представленная работа посвящена определению минимального внутреннего давления, создаваемого наполнителем при формообразовании крутоизогнутых патрубков проталкиванием в криволинейную фильеру матрицы. Формообразование крутоизогнутых патрубков проталкиванием позволяет обеспечить универсальность инструмента, равномерность передачи деформирующей нагрузки на штампуемую заготовку, автоматизацию процесса гибки, и сократить количество штамповочных операций. Внутреннее давление, создаваемое наполнителем, является основным силовым параметром, препятствующим образованию складок и гофров на вогнутой поверхности патрубка. Моделирование процесса формообразования патрубка основано на деформационной теории пластичности и энергетическом критерии устойчивости. При этом была принята гипотеза о том, что в процессе гибки патрубка проталкиванием цилиндрической заготовки через криволинейную фильеру вогнутая поверхность патрубка будет стремиться к гофрообразованию, получая при этом некоторое возмущающее радиальное перемещение. Одновременно с этим, наполнитель, находящийся в патрубке в сжатом состоянии, совершает работу, препятствующую возникновению таких перемещений, тем самым приводя параметры процесса формообразования к основному состоянию. В результате приращение полной энергии, определяемое как разность между работой пластической деформации и работой по преодолению давления для возмущенного состояния, с одной стороны, и работой пластической деформации основного состояния, с другой, должно быть равно нулю. Полученные результаты могут быть взяты за основу для разработки силовой установки для гибки патрубков проталкиванием с ЧПУ.

Ключевые слова: гибка крутоизогнутых патрубков, проталкиванием, устойчивость, внутреннее давление наполнителя.

Для цитирования: Егоров В. Г., Васечкин М. А., Давыдов О. Ю., Кудрявцев Г. В., Прибытков А. В. Определение основного параметра автоматизации процесса гибки труб проталкиванием в криволинейную фильеру матрицы // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 22-30.

Original article

DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETER OF AUTOMATION OF THE PROCESS OF PIPE BENDING BY PUSHING INTO A CURVILINEAR DIE OF A MATRIX

| | | |
|-----------------------|---|--|
| Vladislav G. Egorov | 1 | vlad-niat@mail.ru |
| Maxim A. Vasechkin✉ | 1 | vmax77@mail.ru |
| Oleg Yu. Davydov | 1 | dav_61@mail.ru |
| Georgy V. Kudryavtsev | 1 | gogenaqualang1@ramble.ru |
| Aleksey V. Pribytkov | 2 | pribytkov_aleks@mail.ru |

¹Voronezh state university of engineering technologies, Revolution av., 19, Voronezh, 394036, Russia

²Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Starykh Bolshevikov st., 54 a, Voronezh, 394064, Russia

Annotation. One of the main places of destruction of pipeline systems is destruction of the base metal in the bending zone. Bends of large curvature and distortion of cross sections are stress concentrators and lead to fatigue failures of

pipelines under pulsating pressure of pumps. In this regard, one of the urgent tasks is the development of progressive technologies for the manufacture of steeply curved branch pipes. The presented work is devoted to determining the minimum internal pressure created by the filler during the formation of steeply curved branch pipes by pushing into the curvilinear die of the matrix. Forming of steeply curved branch pipes by pushing allows to ensure universality of the tool, uniformity of transfer of the deforming load to the stamped blank, automation of the bending process, and reduction of the number of stamping operations. Internal pressure created by the filler is the main force parameter preventing formation of folds and corrugations on the concave surface of the branch pipe. Modeling of the branch pipe forming process is based on the deformation theory of plasticity and the energy criterion of stability. In this case, the hypothesis was accepted that in the process of bending the branch pipe by pushing a cylindrical blank through a curvilinear die, the concave surface of the branch pipe will tend to form a corrugation, receiving some disturbing radial movement. At the same time, the filler, located in the branch pipe in a compressed state, does work that prevents the occurrence of such movements, thereby bringing the parameters of the forming process to the main state. As a result, the increment of the total energy, defined as the difference between the work of plastic deformation and the work to overcome the pressure for the disturbed state, on the one hand, and the work of plastic deformation of the main state, on the other, should be equal to zero. The obtained results can be taken as a basis for developing a power unit for bending branch pipes by pushing with numerical control.

Keywords: bending of steeply curved branch pipes, pushing, stability, internal pressure of the filler.

For citation: Egorov V. G., Vasechkin M. A., Davydov O. Yu., Kudryavtsev G. V., Pribytkov A. V. Determination of the main parameter of automation of the process of pipe bending by pushing into a curvilinear die of a matrix. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 22-30. (In Russ.).

Введение

Трубопроводные системы, предназначенные для транспортировки газов и жидкостей, играют важную роль в обеспечении стабильности различных технологических процессов предприятий пищевой, химической, фармацевтической и других отраслей. Такие системы имеют большую протяженность и сложную конфигурацию и состоят из унифицированных элементов преимущественно иностранного производства [1].

Формообразование тонкостенных крутоизогнутых патрубков (отводов), имеющих радиус R изгиба по срединной поверхности отвода, равным $2,0 \div 3,0$ наружного радиуса r_0 трубной заготовки, представляет определенные трудности, связанные с возникновением в процессе гибки труб предельных деформаций, приводящих к браку, признаками которого являются: сплющивание и овальность сечения трубы в зонегиба; образование складок и гофров на вогнутой поверхности патрубка, локализация пластической деформации в виде местных утонений стенки выпуклой поверхности изогнутой трубы [1, 2, 3].

Для формообразования из тонкостенных трубных заготовок патрубков с малыми радиусамигиба применяют проталкивание трубной заготовки заполненной наполнителем через криволинейную фильеру разъемной матрицы (рисунок 1). Такой способ позволяет обеспечить универсальность инструмента, равномерность передачи деформирующей нагрузки на

штампующую заготовку, автоматизацию процесса гибки, и сократить количество штамповочных операций [2, 4, 5].

Процесс формообразования патрубка заключается в том, что трубная заготовка, помещенная в прямолинейную часть ручья и заполненная эластичным или жидким наполнителем, проталкивается через криволинейную часть ручья. Внутреннее давление создается одновременным сжатием наполнителя между проталкивающим пуансоном и подпорной гибкой составной оправкой. Наполнитель должен обладать свойством передачи равномерного всестороннего давления и легкостью его ввода и удаления из заготовок. После изгиба патрубка на заданный угол производится разъем матрицы и извлечение отформованного патрубка.

К основным силовым параметрам процесса формообразования крутоизогнутых патрубков относятся: q - внутреннее давление, создаваемое наполнителем; P - усилие проталкивания; P_1 - усилие противодействия (подпора). Следует отметить, что усилия проталкивания P и подпора P_1 прямо пропорциональны внутреннему давлению q .

Таким образом, основным силовым параметром процесса формообразования крутоизогнутых патрубков является внутреннее давление q , создаваемое наполнителем, которое можно регулировать за счет изменения усилий проталкивания P и подпора P_1 .

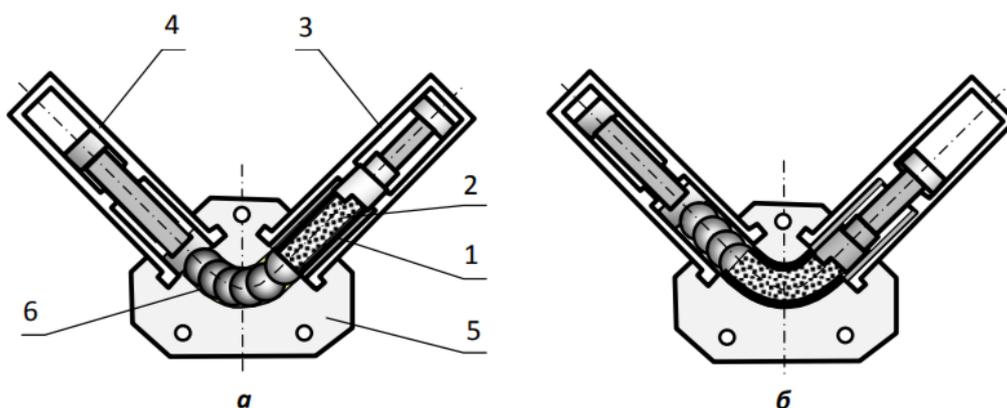


Рисунок 1. Формообразование крутоизогнутых тонкостенных патрубков проталкиванием через криволинейную фильеру матрицы: а – исходное положение; б – конечное положение: 1 – трубная заготовка; 2 – наполнитель; 3 – пуансон проталкивания; 4 – пуансон подпора; 5 – матрица; 6 – гибкая составная оправка

Figure 1. Shaping of steeply curved thin-walled pipes by pushing through a curved die of the matrix: a – initial position; b – final position: 1 – pipe blank; 2 – filler; 3 – pushing punch; 4 – support punch; 5 – matrix; 6 – flexible built-up mandrel

Значение внутреннего давления q должно быть оптимальным, так как малое давление приводит к сплющиванию сечения трубы в зонегиба и образованию складок и гофров на вогнутой поверхности трубы, а чрезмерно высокое давление приводит к увеличению усилия подпора P_1 и сил трения, и как следствие, усилия проталкивания P . Увеличение сил трения может привести к локализации пластической деформации в виде местных утонений стенки выпуклой поверхности изогнутой трубы и последующим разрывам заготовки [6].

Целью исследования является построение математической модели процесса формообразования крутоизогнутых патрубков и определение величины внутреннего давления q наполнителя, препятствующего образованию гофр, а также искажению контура поперечного сечения трубы.

Теоретические основы

Появление гофр и искажение контура поперечного сечения трубы в результате изгиба может быть расценено как потеря устойчивости в процессе проталкивания трубы через матрицу за счет недостаточной величины внутреннего давления наполнителя.

Определить критическую величину давления q полагая приращение полной энергии $\Delta \mathcal{E}$ в результате пластического деформирования равным нулю [7]. При формообразовании крутоизогнутого тонкостенного патрубка проталкиванием цилиндрической заготовки с наполнителем через криволинейную фильеру

вогнутая поверхность патрубка будет стремиться к гофрообразованию, получая при этом некоторое возмущающее перемещение u_r . Одновременно с этим, наполнитель, находящийся в патрубке в сжатом состоянии, совершает работу, препятствующую возникновению таких перемещений, тем самым приводя параметры процесса формообразования к основному состоянию.

Приращение полной энергии $\Delta \mathcal{E}$ можно определить как разность между работой \bar{A}_n пластической деформации и работой A_q по преодолению давления для возмущенного состояния, с одной стороны, и работой A_n пластической деформации основного состояния, с другой:

$$\Delta \mathcal{E} = \bar{A}_n + A_q - A_n. \quad (1)$$

Для определения критической величины внутреннего давления рассмотрим конечный момент формообразования патрубка при изгибе на заданный угол β . В целях упрощения формулировки краевых условий и решения задачи в целом целесообразно использовать тороидальные координаты (рисунок 2). Располагая в центре изгиба оси декартовой системы координат $Oxyz$ получим связь между координатами произвольной точки трубы в декартовой и тороидальной системах координат следующего вида:

$$\begin{cases} x = (R - r \cos \theta) \sin \varphi; \\ y = (R - r \cos \theta) \cos \varphi; \\ z = r \sin \theta. \end{cases} \quad (2)$$

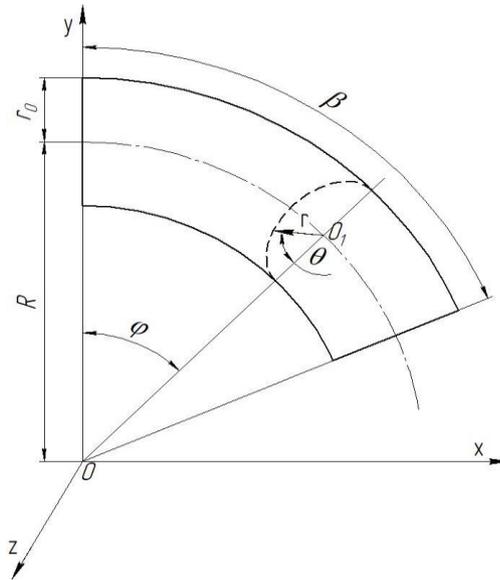


Рисунок 2. Схема крутоизогнутого патрубка в декартовой и тороидальной системах координат: R – радиус изгиба патрубка; r_0 – внешний радиус патрубка; β – угол изгиба патрубка; r – текущий радиус точек патрубка в поперечной плоскости сечения патрубка; θ – угол, характеризующий положение точек патрубка в поперечной плоскости сечения патрубка, отсчитываемый от координатной плоскости Oxy по направлению движения часовой стрелки; φ – угол между неподвижной плоскостью Oyz и плоскостью сечения, проходящей через ось Oz перпендикулярно плоскости Oxy

Figure 2. Schematic diagram of a sharply curved branch pipe in Cartesian and toroidal coordinate systems: R – branch pipe bending radius; r_0 – external branch pipe radius; β – branch pipe bending angle; r – current radius of branch pipe points in the transverse plane of the branch pipe section; θ – angle characterizing the position of branch pipe points in the transverse plane of the branch pipe section, measured from the Oxy coordinate plane in the clockwise direction; φ – angle between the fixed plane Oyz and the section plane passing through the Oz axis perpendicular to the Oxy plane

Компоненты тензора пластических деформаций, во введенной криволинейной системе координат, определяются на основе системы равенств [8, 9]:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{H_r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{H_r H_\theta} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} u_\theta + \frac{1}{H_r H_\varphi} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} u_\varphi; \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{H_\theta} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{H_\theta H_\varphi} \frac{\partial H_\theta}{\partial \varphi} u_\varphi + \frac{1}{H_\theta H_r} \frac{\partial H_\theta}{\partial r} u_r; \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{H_\varphi H_r} \frac{\partial H_\varphi}{\partial r} u_r + \frac{1}{H_\varphi H_\theta} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \theta} u_\theta; \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{H_\theta}{H_r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{H_\theta} \right) + \frac{H_r}{H_\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{u_r}{H_r} \right); \\ \gamma_{r\varphi} &= \frac{H_\varphi}{H_r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\varphi}{H_\varphi} \right) + \frac{H_r}{H_\varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{u_r}{H_r} \right); \\ \gamma_{\theta\varphi} &= \frac{H_\varphi}{H_\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{u_\varphi}{H_\varphi} \right) + \frac{H_\theta}{H_\varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{u_\theta}{H_\theta} \right), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где u_r, u_θ, u_φ – составляющие вектора перемещения точек патрубка в тороидальной системе координат r, θ, φ ; H_r, H_θ, H_φ – коэффициенты Ламе:

$$\left\{ \begin{aligned} H_r &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial r}\right)^2}; \\ H_\theta &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \theta}\right)^2}; \\ H_\varphi &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi}\right)^2}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) система равенств (3) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}; \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{R - r \cos \theta} \left(\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} - u_r \cos \theta + u_\theta \sin \theta \right); \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}; \\ \gamma_{r\varphi} &= \frac{1}{R - r \cos \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{u_\varphi \cos \theta}{R - r \cos \theta}; \\ \gamma_{\theta\varphi} &= \frac{1}{R - r \cos \theta} \frac{\partial u_\theta}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \theta} - \frac{u_\varphi \sin \theta}{R - r \cos \theta}. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Интенсивность деформации сдвига определяется по выражению:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}((\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2) + \gamma_{r\theta}^2 + \gamma_{r\varphi}^2 + \gamma_{\theta\varphi}^2}. \quad (6)$$

Выбор составляющих вектора перемещений должен удовлетворять краевым условиям, а также условию несжимаемости:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_\varphi = 0. \quad (7)$$

Краевые условия данной задачи в тороидальных координатах r, φ, θ определяются следующим. Перемещения по координате φ точек трубы на входе в криволинейную часть ручья и на выходе из неё определяются жестким перемещением инструмента и будут являться постоянными. При нормальном ходе процесса формообразования наружная поверхность трубы контактирует с поверхностью матрицы. Поэтому радиальные перемещения частиц трубы относительно матрицы будут равны нулю.

На контактной поверхности будут действовать силы трения, которые будут равны:

$$\tau_n = \mu \sigma_n. \quad (8)$$

где μ – коэффициент трения; σ_n – нормальное контактное напряжение.

Для относительно тонкостенных труб можно принять, что контактное напряжение на стенке матрицы будет примерно равно внутреннему давлению наполнителя, то есть $\sigma_n \approx q$.

При анализе деформирования тонкостенной трубы с учетом недопущения искажения ее формы в результате потери устойчивости достаточно ограничиться рассмотрением лишь половины объема сжатой области патрубка, полагая, что область изменения переменных r, φ, θ ограничена промежутками:

$$r_0 - t \leq r \leq r_0, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq \beta, \quad (9)$$

где t – толщина стенки трубы.

Краевые условия рассматриваемой задачи запишем в следующем виде:

$$u_\varphi = \text{const} \text{ при } \varphi = 0 \text{ и } \varphi = \beta,$$

$$u_r = 0 \text{ и } \tau_n = \mu q \text{ при } r = r_0.$$

Рассматривая проталкивание трубы в искривленную фильеру того же диаметра, применим для основного деформированного состояния следующее поле перемещений:

$$\begin{aligned} u_r &= 0, \\ u_\theta &= 0, \\ u_\varphi &= -m(R - r \cos \theta) \cos \theta, \end{aligned} \quad (10)$$

где m – некоторая константа.

При формообразовании патрубка ввиду неоднородности процесса пластического течения компоненты перемещений могут получать некоторые возмущения, которые приводят к потере устойчивости – местному выпучиванию.

При выпучивании на внутренней поверхности патрубка будет иметь место радиальное перемещение материала трубы. Поэтому поле перемещений при возмущенном состоянии может быть принято следующим:

$$\begin{aligned} u_r &= \tilde{f}(r, \theta, \varphi), \\ u_\theta &= 0, \\ u_\varphi &= -m(R - r \cos \theta) \cos \theta \end{aligned}$$

(здесь $\tilde{f}(r, \theta, \varphi)$ – некоторая функция).

Поле перемещений при возмущенном состоянии должно удовлетворять условию несжимаемости (7), которое в данном случае принимает вид:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} - \frac{u_r \cos \theta}{R - r \cos \theta} = 0. \quad (11)$$

Решив данное уравнение, получим:

$$u_r = \frac{a f(\theta, \varphi)}{r(R - r \cos \theta)}, \quad (12)$$

где a – некоторая постоянная; $f(\theta, \varphi)$ – произвольная функция, удовлетворяющая граничным условиям: $f(\theta, \varphi) = 0$ при $\varphi = 0$ и $\varphi = \beta$, и при $\theta = \pi/2$ для любого φ .

Функцию $f(\theta, \varphi)$ можно представить в виде:

$$f(\theta, \varphi) = \varphi(\beta - \varphi) \cos \theta. \quad (13)$$

Выражение для определения работы пластической деформации при формообразовании крутоизогнутого патрубка проталкиванием в криволинейную фильеру запишем в виде:

$$A_n = \int_V k \Gamma dV, \quad (14)$$

где V – объем деформируемого материала патрубка; k – сопротивление сдвигу.

Работа по преодолению давления A_q для возмущенного состояния равна интегральной сумме от произведения перемещения u_r на величину внутреннего давления q :

$$A_q = \int_S q u_r dS. \quad (15)$$

Для тонкостенных и особотонкостенных патрубков при $t \ll r_0$ элементарные объем dV патрубка и площадку dS поверхности контакта в тороидальной системе координат можно выразить следующим образом:

$$dV \approx t r_0 (R - r_0 \cos \theta) d\theta d\varphi, \quad (16)$$

$$dS \approx r_0 (R - r_0 \cos \theta) d\theta d\varphi. \quad (17)$$

Величина сопротивления сдвигу k определяется по кривым упрочнения в зависимости от интенсивности деформаций. За-

зависимость кривой упрочнения $\sigma_{ii} = f(e_{ii})$ определяется экспериментально путем испытания на сжатие специальных кольцевых образцов, изготовленных из трубных заготовок, используемых для формообразования патрубков. Для ориентировочных расчетов могут быть использованы кривые упрочнения, имеющиеся в справочной литературе [10, 11].

Для коррозионностойкой стали AISI 321, являющейся зарубежным аналогом стали 12Х18Н10Т, была получена степенная зависимость связывающая интенсивность напряжений σ_{ii} и интенсивность деформаций e_{ii} [12]:

$$\sigma_{ii} = \sqrt{3}k = 1209,7 \cdot e_{ii}^{0,262}. \quad (18)$$

Среднюю величину интенсивности деформации к концу процесса формовки патрубка можно определить по формуле:

$$\bar{e}_{ii} = \frac{\beta(3\delta^2 - 3\delta + 1)}{3\pi\sqrt{3}(\delta - 1)\delta}, \quad (19)$$

где δ – величина равная отношению R/r_0 .

Представленные зависимости позволят определить величину внутреннего давления q наполнителя, препятствующего образованию гофр.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате анализа основного деформированного состояния при формообразовании крутоизогнутого тонкостенного патрубка проталкиванием в криволинейную фильеру работу пластической деформации можно определить по выражению:

$$A_{\pi} = \frac{kmtr_0^2\beta}{3}(3\delta^2 - 3\delta + 1). \quad (20)$$

Работу пластической деформации для возмущенного состояния и работу внутреннего давления наполнителя можно определить по выражениям:

$$\bar{A}_{\pi} = \frac{ktmr_0^2\beta}{3}(3\delta^2 - 3\delta + 1) \times \sqrt{\left(\frac{3a\beta^2}{mr_0^3}\right)^2 \left[\left(\frac{0,15}{\delta - 1}\right)^3 - 0,16^6\right] + 1}, \quad (21)$$

$$A_q = qa \frac{\beta^3}{6}. \quad (22)$$

Константу a определим из следующих соображений. В случае отсутствия наполните-

ля максимально возможное перемещение u_r в результате потери устойчивости при $\varphi = \beta/2$ и $\theta = 0$ будет равно r_0 .

Согласно ГОСТ 17380-2001 на вогнутой поверхности крутоизогнутого патрубка допускаются гофры высотой не более 3% от наружного диаметра патрубка [13]. Для трубопроводных систем из стали 12Х18Н10Т диаметром свыше 24 мм допускаются гофры высотой [14]:

- при диаметре от 24 до 27 мм $h = 0,1$ мм;
- при диаметре от 27 до 35 мм $h = 0,2$ мм;
- при диаметре свыше 35 мм $h = 0,3$ мм.

Следовательно, внутреннее давление наполнителя должно совершить работу по преодолению радиальных деформаций пропорциональных величине $(r_0 - h)$. Тогда выражение для определения константы a примет следующий вид:

$$a = \frac{4r_0^2(r_0 - h)(\delta - 1)}{\beta^2}. \quad (23)$$

Выражение для определения константы m получим из условия равенства длины дуги сжатого слоя волокон, с учетом полученного ими перемещения u_{φ} , длине дуги волокон, расположенных в нейтральном слое:

$$m = \frac{\beta}{(\delta - 1)}. \quad (24)$$

После ряда преобразований получим выражение для определения минимальной величины внутреннего давления q :

$$q = \frac{kt\beta(3\delta^2 - 3\delta + 1)}{2(r_0 - h)(\delta - 1)^2} (\sqrt{B + 1} - 1) \quad (25)$$

где B – безразмерная величина:

$$B = \left(\frac{12(r_0 - h)(\delta - 1)}{r_0\beta}\right)^2 \left[\left(\frac{0,15}{\delta - 1}\right)^3 - 0,16^6\right]$$

На рисунке 3 приведена расчетная графическая зависимость минимальной величины внутреннего давления q для крутоизогнутых патрубков, изготовленных из стали 12Х18Н10Т, с толщиной стенки $t = 1$ мм, угломгиба $\beta = \pi/2$, при наличии гофров высотой не более $h = 0,3$ мм.

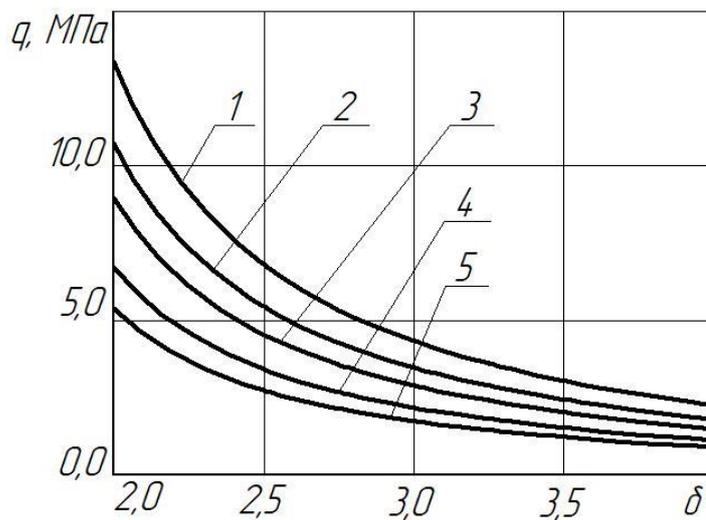


Рисунок 3. График изменения минимальной величины внутреннего давления q от параметра δ при наружном диаметре патрубка: 1 – 40 мм; 2 – 50 мм; 3 – 60 мм; 4 – 80 мм; 5 – 100 мм

Figure 3. Graph of the change in the minimum value of the internal pressure q from the parameter δ at the outer diameter of the pipe: 1 – 40 mm; 2 – 50 mm; 3 – 60 mm; 4 – 80 mm; 5 – 100 mm

Из анализа полученных результатов моделирования видно, что минимальная величина внутреннего давления q уменьшается с увеличением диаметра патрубка и радиуса R гиба. Это объясняется тем, что с увеличением R напряжения изгиба, вызывающие местную потерю устойчивости стенки патрубка, уменьшаются. С увеличением диаметра патрубка, согласно безмоментной теории оболочек, для обеспечения требуемого напряженно-деформированного состояния требуется меньшее давление.

Полученная зависимость (25) может использоваться для определения усилий проталкивания и противодействия, что будет являться основой для разработки силовой установки для гибки патрубков проталкиванием с ЧПУ.

Наряду с силовыми параметрами процесса формообразования крутоизогнутых патрубков проталкиванием через криволинейную фильеру не менее важным параметром является скорость проталкивания, для определения оптимальной величины которой требуется рассмотреть задачу формообразования крутоизогнутых патрубков в динамике.

Выводы

В настоящее время одним из наиболее перспективных способов формообразования тонкостенных и особотонкостенных крутоизогнутых патрубков является проталкивание цилиндрической заготовки через криволинейную фильеру разъемной матрицы. Устойчивое формообразование обеспечивается за счет создания при помощи эластичного наполнителя равномерного внутреннего давления.

В ходе математического моделирования, основанного на деформационной теории пластичности и энергетического критерия устойчивости, получено выражение для определения минимального внутреннего давления, создаваемого наполнителем, находящемся в сжатом состоянии.

Проведенные натурные испытания по формообразованию крутоизогнутых патрубков показали высокую адекватность полученной математической модели реальному процессу. Изготовленные образцы патрубков соответствовали требованиям, приведенным в нормативно-технической документации.

Литература

1. Об особенности деформирования анизотропной трубной заготовки при изгибе проталкиванием / В.Д. Маслов, К.А. Николенко, В.Д. Мисюра, К.А. Николенко. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Т.15, №6, 2013, с. 278 – 284.
2. Матвеев, А.С. Технологическое обеспечение процессов гидроштамповки трубных заготовок : учебное пособие / А.С. Матвеев. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 376 с.
3. Болтенкова, О.М. Моделирование равномерного пластического течения при гибке патрубков. – Вестник ВГУИТ, Ворон. Гос. Унив-т инжен. Технолог. – 2013, № 2, С. 80-83.

4. Способ изготовления гибкой крутоизогнутых патрубков Болтенкова О.М., Давыдов О.Ю., Егоров В.Г., Егоров С.В. Патент на изобретение RU 2528928 C1, 20.09.2014. Заявка № 2013114006/02 от 28.03.2013.
5. Формообразование крутоизогнутых патрубков из тонкостенных заготовок на универсальных гидро-прессах / С.А. Эрбейгель, Э.И. Письменный, И.И.Сагалович // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 4. С. 21 – 24.
6. Руководящий технический материал РТМ 1394-74. Формообразование патрубков из цельных и сварных труб гибкой вталкиванием в фильер с внутренним давлением. – М.: НИАТ, 1974. – 43 с.
7. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем в 2 ч. Часть 1 : учебное пособие для вузов / А.С. Вольмир. – 3-е изд., стер. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 526 с.
8. Новожилов, В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – Ленинград: Судпромгиз, 1958. – 367 с.
9. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учебник для вузов / Н.Н. Малинин. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 402 с.
10. Кроха, В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. – М.: Машиностроение, 1980, 157 с.
11. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Metallurgy, 1983. - 351 с.
12. Определение параметров устойчивого формoизменения при ротационной раскатке тонкостенных труб / М.А. Васечкин, О.Ю. Давыдов, В.Г. Егоров, И.Н. Маслов - Насосы. Турбины. Системы. 2018. № 2 (27). С. 38-46.
13. ГОСТ 17380-2001 (ИСО 3419-81) Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Общие технические условия.
14. Руководящий технический материал РТМ 1.4.1638-90. Конструктивно-технологическая обработка трубопроводных коммуникаций, изготовление и контроль труб и патрубков. – Введен с 01.07.1991. взамен РТМ: 1.4.1638-86 – М.: НИАТ, 1990. – 465 с.

References

1. On the peculiarity of deformation of anisotropic tubular blanks during bending by pushing / V.D. Maslov, K.A. Nikolenko, V.D. Misyura, K.A. Nikolenko. – Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences., I.15, №6, 2013, p. 278 – 284.
2. Matveyev, A. S. Technological support of the processes of hydroforming of tubular blanks: a tutorial / A. S. Matveyev. – Saint Petersburg: Lan, 2021. – 376 p.
3. Boltenkova, O.M. Modeling of uniform plastic flow during bending of pipes. – Proceedings of the VSUET, ¹Voronezh state university of engineering technologies. – 2013, № 2, P. 80-83.
4. Method for manufacturing sharply curved pipes by bending. / Boltenkova O.M., Davydov O.Yu., Egorov V.G., Egorov S.V. Patent for invention RU 2528928 C1, 20.09.2014. Application № 2013114006/02 dated 28.03.2013.
5. Forming of steeply curved branch pipes from thin-walled blanks on universal hydraulic presses/ S.A. Erbeigel, E.I. Pismenny, I.I. Sagalovich// Forging and stamping production. 1989. № 4. P. 21 – 24.
6. Guiding technical materials RTM1394-74. Forming of branch pipes from solid and welded pipes by bending and pushing into a die with internal pressure. – М.: НИАТ, 1974. – 43 p.
7. Volmir, A. S. Stability of deformable systems in 2 parts. Part 1: a textbook for universities / A. S. Volmir. - 3rd ed., stereotype ed. – Moscow: Publishing house Urait, 2024. – 526 p.
8. Novozhilov, V.V. Theory of elasticity / V.V. Novozhilov. – Leningrad: Sudpromgiz, 1958. – 367 p.
9. Malinin, N.N. Applied Theory of Plasticity and Creep: Textbook for Universities / N. N. Malinin. – 3rd ed., corrected and supplemented. – Moscow: Publishing house Urait, 2024. – 402 p.
10. Krokha V.A. Hardening of metals by cold plastic deformation. – М.: Mashinostroeniye, 1980, 157 p.
11. Resistance to plastic deformation of metals and alloys: reference book / P. I. Polukhin, G. Ya. Gun, A. M. Galkin. - 2nd ed., revised and supplemented. - Moscow: Metallurgy, 1983. - 351 p.
12. Determination of parameters of stable shaping during rotational rolling of thin-walled pipes. / M.A. Vasechkin, O.Yu. Davydov, V.G. Egorov, I.N. Maslov - Pumps. Turbines. Systems. 2018. № 2 (27). P. 38-46.
13. GOST 17380-2001 (ISO 3419-81) Seamless welded pipeline parts made of carbon and low-alloy steel. General specifications.
14. Guiding technical materials RTM 1.4.1638-90. Structural and technological processing of pipeline communications, manufacturing and control of pipes and branch pipes. – Introduced since 01.07.1991. Instead of RTM: 1.4.1638-86 – М.: NIATT, 1990. – 465 p.

Сведения об авторах

| ФИО | <i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i> |
|--------------------------------------|---|
| Егоров Владислав Геннадьевич | доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, профессор кафедры технической механики, vlad-niat@mail.ru SPIN-код: 8367-3604 |
| Васечкин Максим Алексеевич | кандидат технических наук, Воронежский государственный университет инженерных технологий, доцент кафедры технической механики, vmax77@mail.ru SPIN-код: 2488-8491 ORCID 0000-0003-1322-8664 |
| Давыдов Олег Юрьевич | кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, доцент кафедры технической механики, dav_61@mail.ru SPIN-код: 3682-2803 |
| Кудрявцев Георгий Владимирович | Воронежский государственный университет инженерных технологий, аспирант кафедры технической механики gogenaqualang1@ramble.ru |
| Прибытков Алексей Викторович | кандидат технических наук, доцент, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», старший преподаватель кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов, pribytkov_aleks@mail.ru SPIN-код: 1740-4083 |

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> |
|--|--|
| Egorov Vladislav Gennadyevich | DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of Department of Technical Mechanics, vlad-niat@mail.ru SPIN-code: 8367-3604 |
| Vasechkin Maxim Alekseyevich | PhD, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of Department of Technical Mechanics, vmax77@mail.ru SPIN-code: 2488-8491 ORCID 0000-0003-1322-8664 |
| Davydov Oleg Yuryevich | PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of Department of Technical Mechanics, dav_61@mail.ru SPIN-code: 3682-2803 |
| Kudryavtsev Georgy Vladimirovich | Voronezh state university of engineering technologies, postgraduate of Department of Technical Mechanics, gogenaqualang1@ramble.ru |
| Pribytkov Aleksey Victorovich | PhD, associate professor, MESCAF «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», senior lecturer of Department of Aviation Complexes and Aircraft Construction, pribytkov_aleks@mail.ru SPIN-code: 1740-4083 |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 26.11.2024 | одобрена после рецензирования 02.12.2024 | принята к публикации 16.12.2024 |
| the article was submitted 26.11.2024 | approved after reviewing 02.12.2024 | accepted for publication 16.12.2024 |

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАКАЗАМИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОПЕРАТОРА

Ольга Александровна Исабекова[✉] ¹ isabekova@mirea.ru
Владислав Валерьевич Дудин ¹ iamvladdudin@mail.ru

¹МИРЭА - Российский технологический университет, проспект Вернадского, дом 78, г. Москва, 119454, Россия

Аннотация. В статье рассматривается применение методологии предметно-ориентированного проектирования (англ. Domain-Driven Design, DDD) при разработке системы управления заказами (англ. Order Management System, OMS) для телекоммуникационного оператора. Методология DDD ориентирована на создание программных решений, учитывающих ключевые аспекты бизнес-процессов и взаимодействие с другими системами. В рамках теоретического исследования продемонстрировано использование принципов DDD для проектирования OMS, являющейся частью стека программного обеспечения для систем поддержки бизнеса (BSS). В рамках работы анализируются три ключевых правила DDD: фокус на основной области домена, использование универсального языка и явное определение границ системы. Пример реализации OMS показывает, как акцент на специфику телекоммуникационных услуг позволяет формировать модель, отражающую бизнес-процессы провайдера. Приведен пример использования универсального языка, включающего специализированные термины, назначение которого является снижением недопонимания между участниками проекта. В исследовании представлено определение границ контекста на примере бизнес-процесса в OMS, выделены ключевые моменты обеспечения изоляции системы и роль системы OMS относительно стека BSS и OSS.

Ключевые слова: предметно-ориентированное проектирование, системы поддержки бизнеса, системы управления заказами, телеком, TM Forum.

Для цитирования: Исабекова О. А., Дудин В. В. Особенности предметно-ориентированного проектирования систем управления заказами телекоммуникационного оператора // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 31-37.

Original article

FEATURES OF SUBJECT-ORIENTED DESIGN OF TELECOMMUNICATION ORDER MANAGEMENT SYSTEMS

Olga A. Isabekova[✉] ¹ isabekova@mirea.ru
Vladislav V. Dudin ¹ iamvladdudin@mail.ru

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

Abstract. The article explores the application of the Domain-Driven Design (DDD) methodology in developing an Order Management System (OMS) for a telecommunications operator. DDD focuses on creating software solutions that address the key aspects of business processes and interactions with other systems. This theoretical study demonstrates the use of DDD principles in designing OMS, which forms part of the software stack for Business Support Systems (BSS). The paper examines three core DDD principles: focusing on the core domain, employing a ubiquitous language, and explicitly defining system boundaries. The OMS implementation example highlights how focusing on the specifics of telecommunication services enables the creation of a model that reflects the provider's business processes. A practical example of employing a ubiquitous language with specialized terminology is provided, aiming to minimize misunderstandings among project participants. The study also presents the definition of context boundaries using an OMS business process example, emphasizing key aspects of system isolation and OMS's role relative to the BSS and OSS stacks.

Keywords: domain-driven design, business support systems, order management systems, telecom, TM Forum.

For citation: Isabekova O. A., Dudin V. V. Features of subject-oriented design of telecommunication order management systems. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 31-37. (In Russ.).

Введение

Предметно-ориентированное проектирование (англ. Domain-Driven Design, DDD) представляет собой набор правил, методологию по разработке комплексного программного обеспечения, которое сочетает в себе большой объем логики и количество взаимодействий с другим программным обеспечением [1]. Методология

отдает приоритет бизнес-сфере как движущей силе проектирования архитектуры [2].

Примером комплексных решений является стек программного обеспечения для реализации услуг телекоммуникационных провайдеров, где ставится задача обеспечить процесс предоставления услуги «от и до». Данный процесс включает в себя определенные шаги, где каждая система в стеке должна выполнять свою

функцию, иначе будут большие трудности в отладке всего процесса. Поэтому принято выделять определенные границы систем, их функционал и взаимодействие со смежными системами. В области телекома выделяют организацию TM Forum [3], которая определяет международные стандарты и рекомендации к системам, число которых достигает десятков, а то и

сотен. В связи с этим, выделяют определенные домены (англ. domains), которые призваны выполнять свою бизнес-задачу. На рисунке 1 представлен пример доменной модели IT-компании Netcracker [4], которая специализируется на разработке программного обеспечения (ПО) для телекоммуникационных провайдеров.

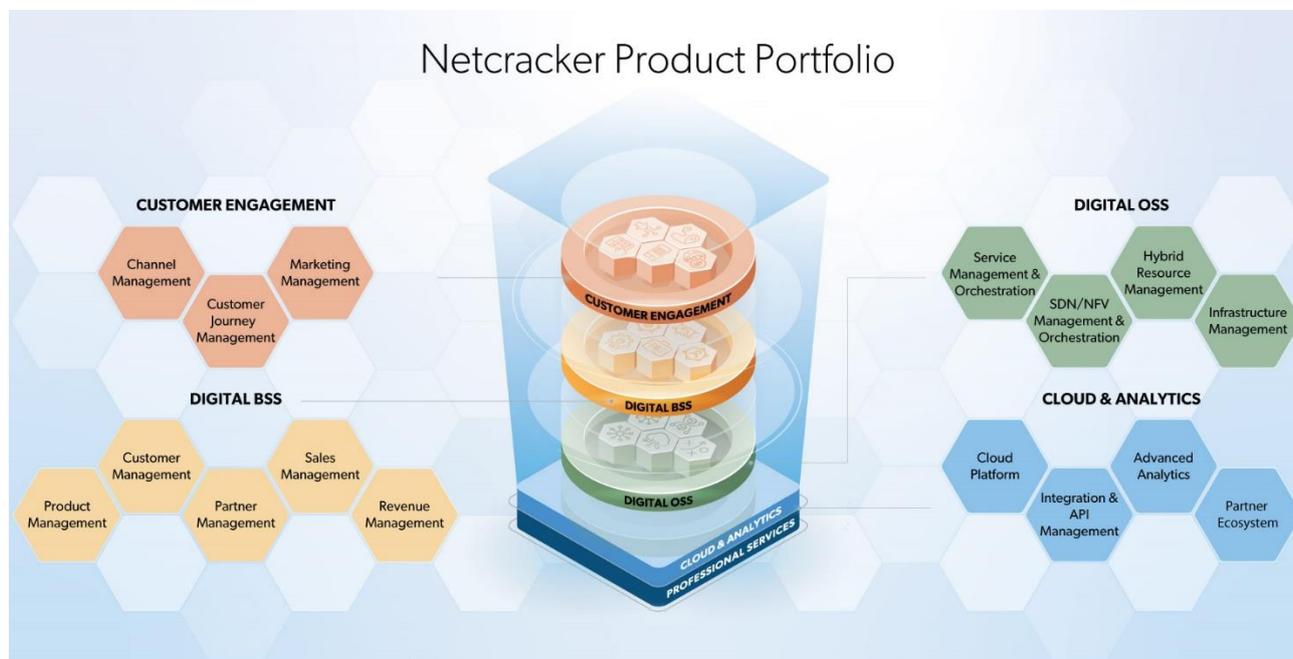


Рисунок 1. Портфолио продуктов компании Netcracker

Figure 1. Netcracker Product Portfolio

В данной работе приведен пример использования ключевых правил DDD для системы управления заказами (англ. Order Management System, OMS) телекоммуникационного оператора, являющейся одним из компонентов стека ПО для систем поддержки бизнеса провайдеров [4,5]. На примере доменной модели Netcracker, OMS находится в составе Digital BSS (с англ. Цифровые системы поддержки бизнеса). Цель исследования – по ключевым этапам продемонстрировать целесообразность использования методологии DDD для систем управления заказами.

Материал и методы исследования

Методология DDD определяет ряд ключевых правил при проектировании [1]:

1. фокус на основной области домена,
2. использование универсального языка (Ubiquitous Language),
3. явное определение контекста, границ системы (Bounded Context).

Рассмотрим ключевые правила на примере системы управления заказами (далее

OMS). OMS – это программное приложение, предназначенное для автоматизации полного цикла управления заказами, используется для поддержки бизнес-процессов, связанных с обработкой заказов на предоставление различных видов услуг связи [6].

Вышеуказанное определение показывает сущность данной системы, но для выполнения первого пункта рассматриваемой методологии следует учесть бизнес-предназначение и область ее имплементации. Для рассматриваемого примера – это сфера обработки заказов у телекоммуникационного оператора. Итого, при проектировании, в первую очередь должна рассматриваться специфика телекоммуникационного провайдера, например, бизнес-процесс, который должен быть реализован. Другими словами, проектная команда должна сосредоточиться на ключевых аспектах домена, наиболее важных для бизнеса, что позволит создать четкую и понятную модель, которая поставит вектор разработки будущего продукта. Данные условия полностью соответствуют выполнению пункта 1 методологии DDD.

При сосредоточении команды на определенных бизнес-процессах, могут возникнуть трудности в понимании сферы деятельности. Например, разработчик может не совсем понимать терминологию заказчика или бизнес-аналитика. Для того, чтобы все участники процесса понимали друг друга, второй пункт методологии предлагает ввести универсальный язык, который следует использовать в процессе взаимодействия между участниками проекта. Обычно, это ряд специализированных терминов, которые свойственны именно для сферы деятельности заказчика. Для области телекома, особенно для OMS, ключевыми терминами могут быть обобщенные названия частых операций (напр. Port-In, Port-out – подключение, отключение клиента от определенного сервиса), названия сущностей (напр. Product Order, Service Order – заказ определенного продукта, заказ на определенную услугу, обычно, связанную с продуктом). Для сущностей и атрибутов часто используется терминология из стандартов TM Forum для разработки программных интерфейсов [9, 10, 11, 12]. На рисунке 2 представлен упрощенный пример сущности Order. Все атрибуты сущности Order названы в соответствии с логикой, которую они в себе несут.

Как результат, команде следует использовать универсальный язык в коммуникации, документации, коде и тестах. Это минимизирует недоразумения между техническими специалистами и экспертами в предметной обла-

сти, а также позволяет однозначно воспринимать важную информацию. Пункт 2 методологии DDD выполнен.

Order

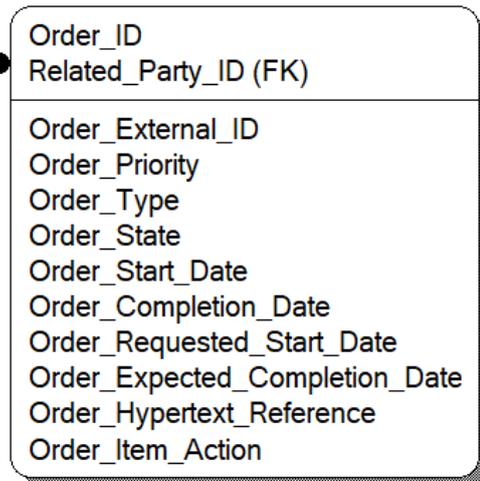


Рисунок 2. Пример логической модели данных сущности Order

Figure 2. Example of a logical data model of the Order entity

На рисунках 3, 4, 5 представлена часть обобщенного процесса подключения услуги «Мобильная Линия» в нотации IDEF0. OMS выступает в роли промежуточной системы, находящейся между стеком BSS (системы поддержки бизнеса) и OSS (системы поддержки операций).

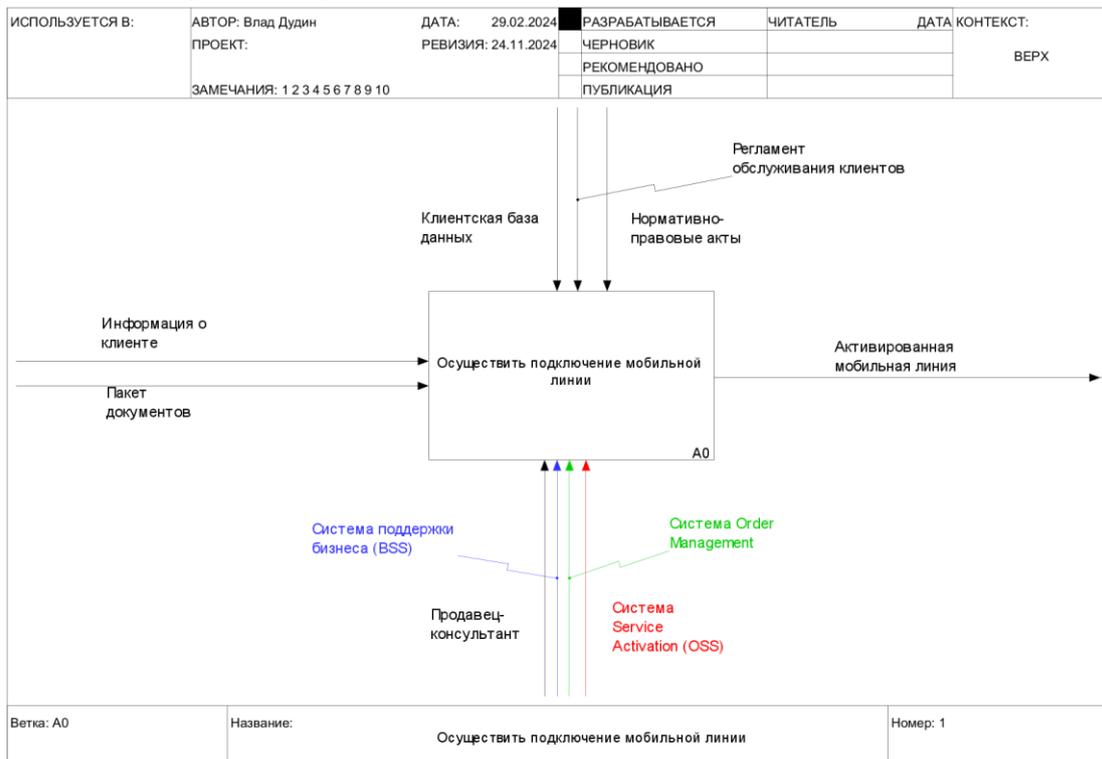


Рисунок 3. Процесс подключения мобильной линии

Figure 3. Mobile line activation process

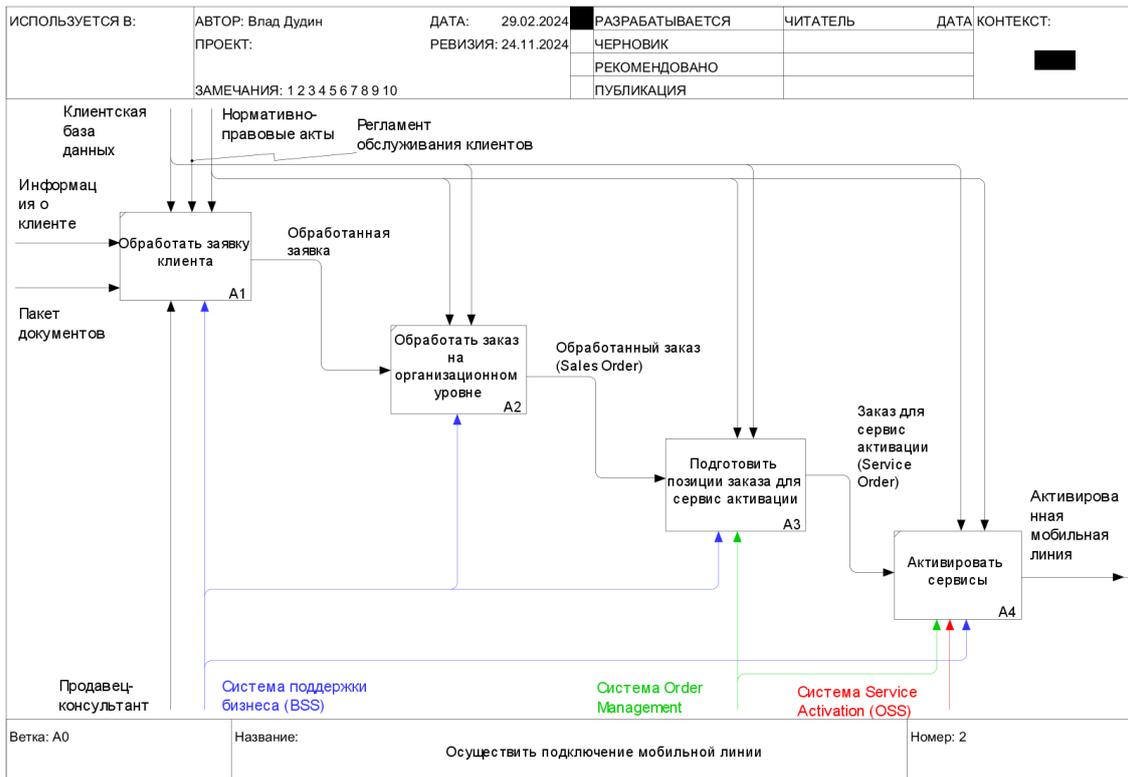


Рисунок 4. Подпроцесс подключения мобильной линии

Figure 4. Subprocess of mobile line connection

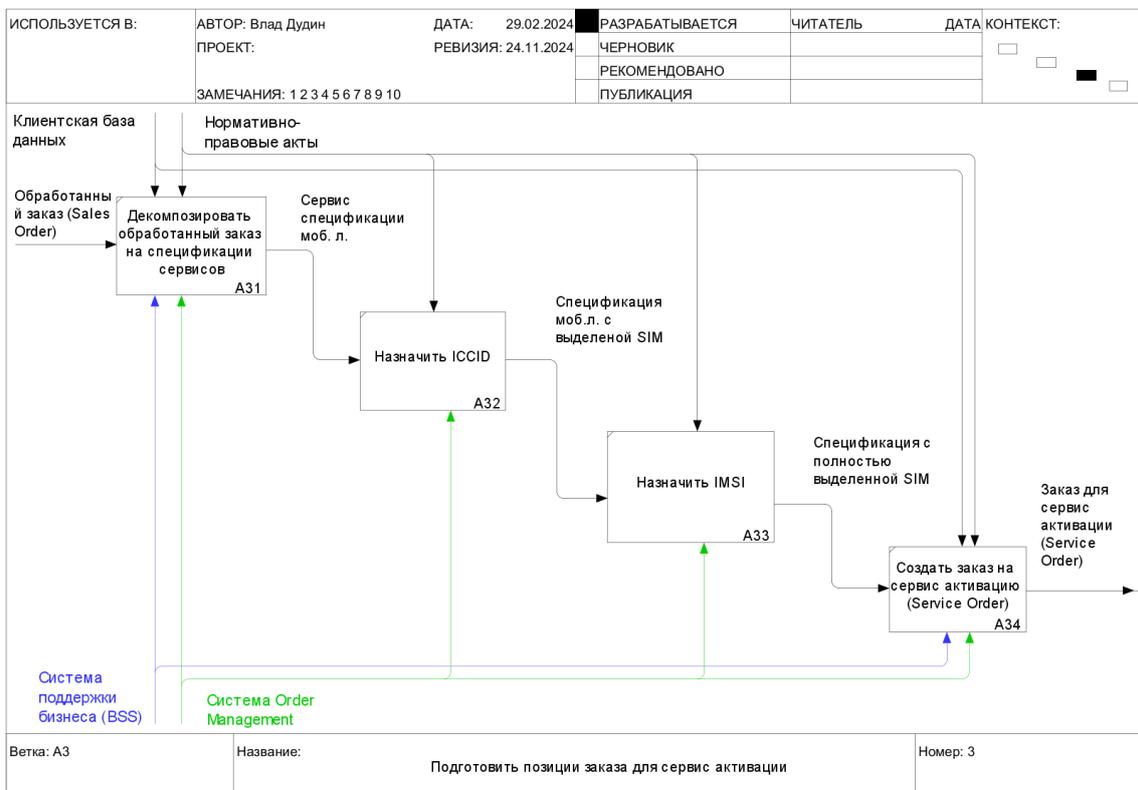


Рисунок 5. Подпроцесс подготовки заказа для активации

Figure 5. Subprocess of preparing an order for activation

Заметим, что OMS выполняет только определенные процедуры в бизнес-процессе подключения. Подавляющее количество других функций выполняются уже стеками BSS и OSS. Из этого следует, что OMS присуще выполнение ряда утвержденных операций и ничего кроме них – что справедливо и для остальных систем в данном процессе. Пример отражает 3-й пункт методологии DDD, который гласит, что каждый фрагмент модели должен быть определен в своем контексте, чтобы избежать конфликтов при использовании моделей для разных частей системы. Данное правило нацелено на помощь в управлении сложностью проекта, поддержке чистоты кода.

Результаты исследования

Рассмотрение каждого принципа показало их практическую значимость и эффективность при проектировании OMS в сфере телекоммуникаций:

1. Фокус на основной области домена: при проектировании OMS акцент должен быть сделан на учет специфики бизнес-процессов телекоммуникационного провайдера, таких

как управление заказами на подключение или изменение услуг.

2. Использование универсального языка: определение ключевой терминологии позволит снизить недопонимания между участниками процесса и унифицировать документацию, программный код, тестовые сценарии.

3. Явное определение контекста: OMS выполняет строго определенный набор функций, выступая в роли промежуточной системы между стеками BSS и OSS.

Выводы

В ходе исследования продемонстрировано применение ключевых принципов предметно-ориентированного проектирования на примере разработки системы управления заказами для телекоммуникационного оператора. Результаты исследования показывают, что использование методологии DDD способствует созданию программных решений, которые учитывают как бизнес-требования, так и техническую специфику.

Литература

1. Evans, E. Domain-Driven Design Reference: Definitions and Pattern Summaries [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.domainlanguage.com/ddd/reference/> (дата обращения: 24.11.2024).
2. TM Forum [Электронный ресурс]: URL: <https://www.tmforum.org> (дата обращения: 24.11.2024).
3. Jordanov, J., Petrov, P. Domain-Driven Design Approaches in Cloud-Native Service Architecture // TEM Journal. – 2023. – Volume 12, Issue 4. – P. 1985–1994. – DOI: 10.18421/TEM124-09.
4. Netcracker Customer Order Management: [Электронный ресурс] // Netcracker. URL: <https://www.netcracker.com/portfolio/products/digital-bss/customer-management/> (Дата обращения 24.11.2024).
5. Современные подходы к автоматизации бизнес-процессов операторов связи : учебное пособие / А. Б. Гольдштейн, С. В. Кисляков ; СПбГУТ. – СПб., 2020. – 84 с.
6. Дудин, В. В. Специфика проектирования систем управления заказами в сфере телекоммуникационных услуг / В. В. Дудин, О. В. Чушкин // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 07–08 декабря 2023 года. – Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского, 2023. – С. 46-49. – EDN OSFSUS.
7. Fajar, A. N. Design and implementation of microservices system based on domain-driven design / A. N. Fajar, E. Novianti, Firmansyah // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 7. – P. 3058-3062. – DOI 10.30534/ijeter/2020/30872020. – EDN ARVBCB.
8. Современные подходы к автоматизации бизнес-процессов операторов связи : учебное пособие / А. Б. Гольдштейн, С. В. Кисляков ; СПбГУТ. – СПб., 2020. – 84 с.
9. TMFC001 Product Catalog Management v1.2.1: [Электронный ресурс] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc001-product-catalog-management-v1-2-1> (Дата обращения 24.11.2024).
10. TMFC006 Service Catalog Management v1.0.1: [Электронный ресурс] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc006-service-catalog-management-v1-0-1/> (Дата обращения 24.11.2024).

11. TMFC003 Product Order Delivery Orchestration and Management v1.0.1: [Электронный ресурс] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc003-product-order-orchestration-and-management-v1-0-1> (Дата обращения 24.11.2024).

12. TMFC007 Service Order Management v1.1.1: [Электронный ресурс] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/specifications/tmfc007-service-order-management-v1-1-1> (Дата обращения 24.11.2024).

References

1. Evans, E. Domain-Driven Design Reference: Definitions and Pattern Summaries [Electronic resource]. – URL: <https://www.domainlanguage.com/ddd/reference/> (accessed: 24.11.2024).

2. TM Forum [Electronic resource]: URL: <https://www.tmforum.org> (accessed: 24.11.2024).

3. Jordanov, J., Petrov, P. Domain-Driven Design Approaches in Cloud-Native Service Architecture // TEM Journal. – 2023. – Volume 12, Issue 4. – P. 1985–1994. – DOI: 10.18421/TEM124-09.

4. Netcracker Customer Order Management: [Electronic resource] // Netcracker. URL: <https://www.netcracker.com/portfolio/products/digital-bss/customer-management/> (accessed: 24.11.2024).

5. Modern Approaches to Automation of Business Processes of Communication Operators: Textbook / A. B. Goldstein, S. B. Kislyakov; SPbSUT. – St. Petersburg, 2020. – 84 p.

6. Dudin, V. V. Specifics of Designing Order Management Systems in the Field of Telecommunication Services / V. V. Dudin, O. V. Chushkin // Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovation Projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Moscow, December 7–8, 2023. – Moscow: Association of Alumni and Employees of the Zhukovsky Air Force Engineering Academy for Preservation of Historical and Scientific Heritage of the Zhukovsky Air Force Engineering Academy, 2023. – P. 46–49. – EDN OSFSUS.

7. Fajar, A. N. Design and Implementation of Microservices System Based on Domain-Driven Design / A. N. Fajar, E. Novianti, Firmansyah // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 7. – P. 3058–3062. – DOI: 10.30534/ijeter/2020/30872020. – EDN ARVBCB.

8. Modern Approaches to Automation of Business Processes of Communication Operators: Textbook / A. B. Goldstein, S. B. Kislyakov; SPbSUT. – St. Petersburg, 2020. – 84 p.

9. TMFC001 Product Catalog Management v1.2.1: [Electronic resource] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc001-product-catalog-management-v1-2-1> (accessed: 24.11.2024).

10. TMFC006 Service Catalog Management v1.0.1: [Electronic resource] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc006-service-catalog-management-v1-0-1/> (accessed: 24.11.2024).

11. TMFC003 Product Order Delivery Orchestration and Management v1.0.1: [Electronic resource] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/technical-specification/tmfc003-product-order-orchestration-and-management-v1-0-1> (accessed: 24.11.2024).

12. TMFC007 Service Order Management v1.1.1: [Electronic resource] // TM Forum. URL: <https://www.tmforum.org/resources/specifications/tmfc007-service-order-management-v1-1-1> (accessed: 24.11.2024).

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|-------------------------------------|--|
| Исабекова Ольга Александровна | кандидат экономических наук, доцент, МИРЭА - Российский технологический университет, доцент кафедры «Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий», isabekova@mirea.ru SPIN-код: 2573-8975 ORCID 0000-0001-5758-1158 Scopus 57203208483 |
| Дудин Владислав Валерьевич | студент-магистр, МИРЭА - Российский технологический университет, студент кафедры «Математического обеспечения и стандартизации информационных технологий», iavvladdudin@mail.ru |

Authors information

| | |
|-----------------------------------|---|
| Last name, first name, patronymic | Information (<i>academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors</i>) |
| Isabekova Olga Alexandrovna | PhD, associate professor, MIREA - Russian Technological University", associate professor of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, isabekova@mirea.ru SPIN-code: 2573-8975 ORCID 0000-0001-5758-1158 Scopus 57203208483 |
| Dudin Vladislav Valerievich | Master's student, MIREA - Russian Technological University", student of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, iamvladdudin@mail.ru |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 23.11.2024 | одобрена после рецензирования 04.12.2024 | принята к публикации 17.12.2024 |
| the article was submitted 23.11.2024 | approved after reviewing 04.12.2024 | accepted for publication 17.12.2024 |

Обзорная статья

УДК 004.45

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММ «1С: ЗАРПЛАТА И УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ 8» И «БОСС-КАДРОВИК»

Кирилл Станиславович Косогоров

kosgor2001@yandex.ru

МИРЭА - Российский технологический университет, Институт информационных технологий, проспект Вернадского, д. 78 с. 4, г. Москва, 119454, Россия

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ двух программных продуктов для автоматизации кадрового учета и расчета заработной платы: «1С: Зарплата и управление персоналом 8» и «БОСС-Кадровик». Рассматриваются функциональные возможности каждого из решений, их особенности и преимущества в контексте различных сфер применения. Особое внимание уделяется интерфейсу, структуре программ, гибкости настройки, возможности интеграции с другими системами, а также стоимости внедрения и поддержки. На основе анализа делаются выводы о целесообразности использования каждого из продуктов в зависимости от масштабов и потребностей организации, особенностей кадровой политики и бюджетных ограничений.

Ключевые слова: автоматизация кадрового учета, расчет заработной платы, 1С: Зарплата и управление персоналом 8, БОСС-Кадровик, сравнительный анализ, интеграция систем, программное обеспечение.

Для цитирования: Косогоров К. С. Сравнительный анализ программ «1С: Зарплата и управление персоналом 8» и «БОСС-Кадровик» // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 38-42.

Review article

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROGRAMS “1С: SALARY AND PERSONNEL MANAGEMENT 8” AND BOSS HR

Kirill S.Kosogorov

kosgor2001@yandex.ru

MIREA - Russian Technological University, Institute of Information Technologies, Vernadsky Avenue, 78, building 4, Moscow, 119454, Russia

Abstract: The article provides a comparative analysis of two software products for automating personnel records and payroll: “1С: Salary and Personnel Management 8” and “BOSS-Kadrovik”. The capabilities of each of the solutions, their features and advantages in twenty different areas of application are considered. Particular attention is paid to the interface, program structure, configuration flexibility, the ability to integrate with other systems, as well as the cost of implementation and support. Based on the analysis, conclusions are drawn about the advisability of using each product depending on the size and needs of the organization, the specifics of personnel policy and budget constraints. In addition, the article provides practical recommendations for choosing the optimal software depending on the specifics of business processes and the industry focus of the enterprise.

Keywords: automation of personnel records, payroll, 1С: Salary and Personnel Management, BOSS-HR, comparative analysis, systems integration, software.

For citation: Kosogorov K. S Comparative analysis of the programs “1С: Salary and personnel management 8” and BOSS HR. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 38-42. (In Russ.).

Введение

Программы «1С: Зарплата и управление персоналом 8» и «БОСС-Кадровик» были разработаны в России в ответ на потребность предприятий в автоматизации кадрового учета и расчета заработной платы в условиях перехода к цифровым технологиям в 1990-х и 2000-х годах. Эти решения эволюционировали на протяжении десятилетий и стали одними из самых востребованных на рынке, предлагая различные подходы к управлению персоналом и интеграции с другими системами учета.

Основная часть

С 2022 году значительно вырос интерес к вопросам импортозамещения в сфере программного обеспечения для кадрового учета. Это связано с необходимостью замены иностранных решений на отечественные программы. Согласно данным о ключевых запросах в интернете (рисунок 1) [1], многие компании начали искать альтернативы зарубежным продуктам, таким как Oracle и Microsoft, которые ранее широко использовались для управления кадровыми системами и расчетов заработной платы.

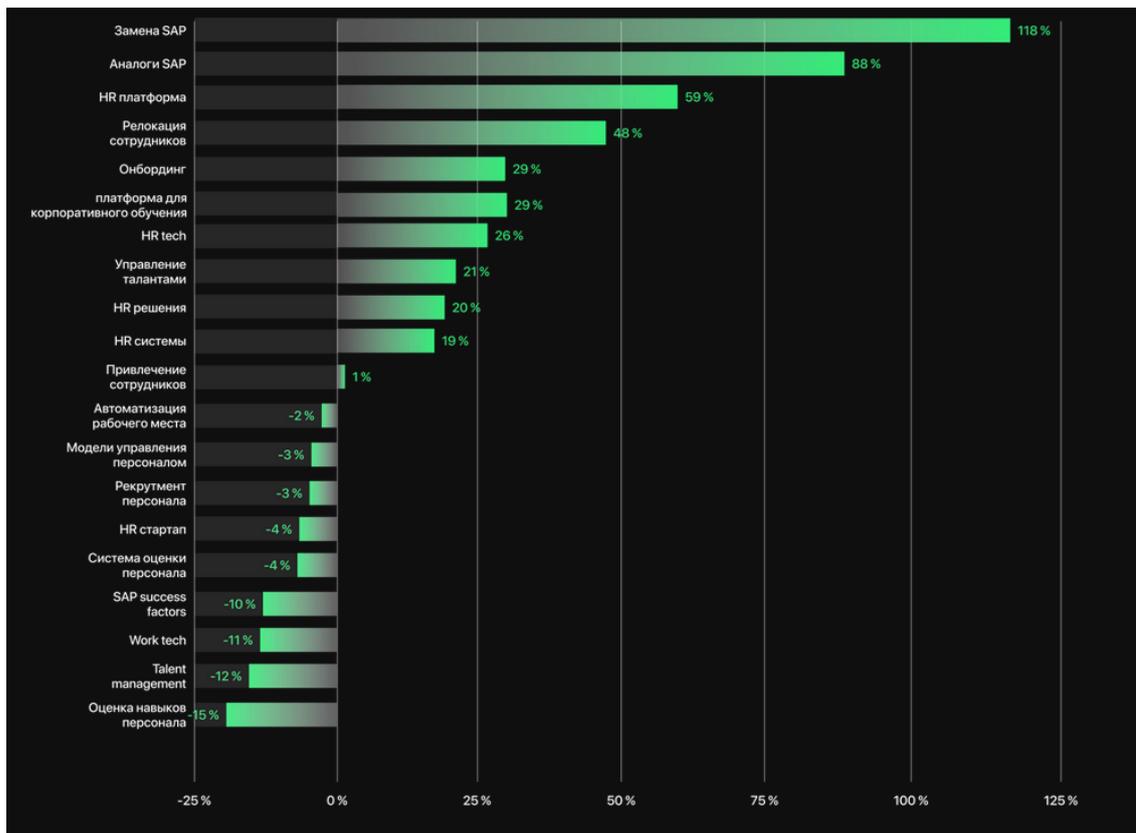


Рисунок 1. Динамика запросов на 2022 год

Figure 1. Dynamics of requests for 2022

В 2024 году, согласно рейтингу HRM-систем от Market.CNews (рисунок 2) [2], БОСС-Кадровик занял первое место, обойдя другие российские аналоги, включая 1С: Зарплата и управление персоналом 8, который оказался на втором месте. Основными причи-

нами успеха БОСС-Кадровик являются его высокая производительность и способность работать с крупными предприятиями, в то время как 1С остается популярной среди малых и средних организаций.

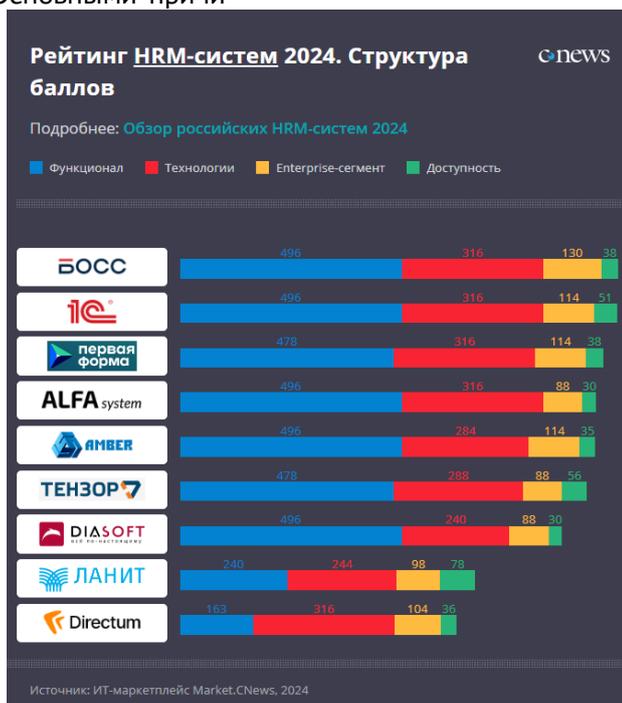


Рисунок 2. Рейтинг HRM систем на 2024 год

Figure 2. Rating of HRM systems for 2024

Согласно списку конкурентных преимуществ (рисунок 3), БОСС-Кадровик пре-

восходит другие российские HRM-системы по нескольким ключевым параметрам:

Конкурентные преимущества

| | БОСС | Российские платформы | Мировые лидеры |
|---|------|----------------------|----------------|
| Регистрация в реестре отечественного ПО | ++ | ++ | - |
| Расчеты выполняются в единой базе при большом количестве сотрудников (даже при 100+ тыс. человек) | ++ | - | ++ |
| Быстродействие расчетов на большом количестве сотрудников (от 5000 человек) | ++ | - | ++ |
| Позиционирование решения для малого и среднего бизнеса | + | ++ | - |
| Поддержка историчности данных | ++ | + | ++ |
| Простота внесения изменений в систему (новые налоговые схемы или новый вид оплаты) | ++ | - | ++ |
| Работа с организационной структурой | ++ | - | ++ |
| Бесшовная версияность (переход с одной версии решения на другую) | ++ | + | ++ |
| Простота установки функциональных обновлений | ++ | - | - |
| Гибкий подход к перерасчетам (при необходимости) | ++ | + | ++ |
| Большое количество полей и атрибутов по сотрудникам | ++ | + | ++ |
| Низкая стоимость реализации проекта | + | ++ | - |
| Техническая поддержка напрямую от вендора | ++ | - | - |
| Оперативность внесения законодательных изменений в систему | ++ | + | - |

Рисунок 3. Конкурентные преимущества «БОСС-Кадровик»

Figure 3. Competitive advantages «BOSS-Kadrovik»

Источник: разработано автором

Для проведения сравнительного анализа программ «1С:Зарплата и управление персоналом 8» и «БОСС-Кадровик» можно рассмотреть ключевые аспекты их функциональности и стоимости. Для этого сравним прибли-

тельные показатели, которые указаны в таблице 1 [3,4]. Используем метод нормализации и взвешенного суммирования для оценки эффективности программ [5].

Таблица 1. Сравнение показателей эффективности программных продуктов

Table 1. Comparison of software product performance indicators

| | Стоимость внедрения (рублей) / The cost of implementation (rubles) | Количество поддерживаемых сотрудников (человек) / Number of supported employees (people) | Время на обучение сотрудников (часов) / Employee training time (hours) | Возможности интеграции с другими системами (оценка по 10-балльной шкале) / Integration with other systems (10-point scale) |
|---|--|--|--|--|
| 1С:ЗУП 8 / 1С: ZUP 8 | 18 100 | 30 000 | 40 | 9 |
| БОСС-Кадровик / BOSS-HR Officer | 60 000 | 50 000 | 60 | 7 |
| Вес показателя, % / Indicator weight, % | 30 | 30 | 20 | 20 |

Нормализация данных:

1. Стоимость внедрения:

- Чем ниже стоимость, тем выше балл. Нормализуем данные:
«1С:ЗУП 8» = $60000 / 18100 = 3.31$
- «БОСС-Кадровик» = $60000 / 60000 = 1$

2. Поддерживаемое количество сотрудников:

- Чем больше сотрудников поддерживает система, тем выше балл. Нормализуем данные:
«1С:ЗУП 8» = $30000 / 50000 = 0.6$
- «БОСС-Кадровик» = $50000 / 50000 = 1$

3. Время на обучение:

- Чем меньше время на обучение, тем выше оценка. Нормализуем данные:
 «1С:ЗУП 8» = 60 / 40=1.5
 «БОСС-Кадровик» = 60 / 60 = 1

4. Возможности интеграции:

- Чем выше оценка интеграции, тем лучше:
 «1С:ЗУП 8» = 9
 «БОСС-Кадровик» = 7

Итоговый расчет:

Вычисление итогового значения производилось по формуле [6]: Итоговое значение = (Нормализованное значение по стоимости × 0.30) + (Нормализованное значение по количеству сотрудников × 0.30) + (Нормализованное значение по времени обучения × 0.20) + (Оценка по интеграции × 0.20)

1. 1С:ЗУП 8:

- Стоимость внедрения: 3.31×0.30=0.993
- Поддерживаемое количество сотрудников: 0.6×0.30=0.18
- Время на обучение: 1.5×0.20=0.30
- Возможности интеграции: 9×0.20=1.80

Итоговый рейтинг 1С:ЗУП 8:

0.993+0.18+0.30+1.80=3.273

2. БОСС-Кадровик:

- Стоимость внедрения: 1×0.30=0.30
- Поддерживаемое количество сотрудников: 1×0.30=0.30
- Время на обучение: 1×0.20=0.20
- Возможности интеграции: 7×0.20=1.40

Итоговый рейтинг БОСС-Кадровик:

0.30+0.30+0.20+1.40=2.20

Результаты исследования и их обсуждение

На основании проведенного сравнительного анализа программ, «1С:Зарплата и управление персоналом 8» получает более высокий итоговый рейтинг эффективности (3.273) по сравнению с «БОСС-Кадровик» (2.20). Это делает «1С:ЗУП 8» более выгодным решением для автоматизации кадрового учета и расчета заработной платы в большинстве организаций.

Также в таблице 2 представлены параметры сравнения, которые не относятся к показателям для оценки рейтинга эффективности.

Таблица 2. Параметры сравнения

Table 2. Comparison parameters

| Параметр сравнения / Comparison parameter | 1С: ЗУП / 1С: ZUP | БОСС-Кадровик / BOSS-HR Officer |
|---|-------------------|---------------------------------|
| Популярность системы / The popularity of the system | + | - |
| Большое количество квалифицированных кадров на рынке / A large number of qualified personnel in the market | + | - |
| Большое количество модулей / A large number of modules | + | - |
| Возможность создания сложных процедур и модификации настроек / The ability to create complex procedures and modify settings | + | + |
| Масштабируемость / Scalability | - | + |
| Настройка для специфических нужд / Customization for specific needs | - | + |
| Поддержка большого количества сотрудников / Support for a large number of employees | - | + |
| Специализированная поддержка / Specialized support | - | + |

Выводы

На основании вышенаписанного, «1С:Зарплата и управление персоналом 8» и «БОСС-Кадровик» предоставляют мощные решения для управления персоналом и расчетов заработной платы, но ориентированы на разные категории бизнеса. 1С: ЗУП подходит для малого и среднего бизнеса благодаря доступности и интеграции с продуктами 1С, в то

время как «БОСС-Кадровик» является лучшим выбором для крупных предприятий с числом сотрудников в десятки тысяч благодаря своей масштабируемости, производительности и специализированной поддержки. Выбор между этими системами зависит от потребностей компании в отношении объема сотрудников, бюджета на внедрение и поддержки.

Литература

1. «HR-tech на развивающихся рынках: итоги 2022 года» [Электронный ресурс]: <https://hredtech.vc/research2022>.
2. «Рейтинг российских HRM-систем 2024» [Электронный ресурс]: https://market.cnews.ru/news/top/2024-05-27_marketcnews_opublikoval_pervyj.
3. «Подбор HRM-систем от поставщиков» [Электронный ресурс]:

<https://market.cnews.ru/service/hrm>.

4. «Сравнение HRM-систем от поставщиков» [Электронный ресурс]: https://www.cnews.ru/reviews/hrm-sistemy_2024/review_table/7867fdb24fae4c85d8fd6ea703d0ab78891131d9.

5. «Общий рейтинг эффективности и коэффициент компетенции» [Электронный ресурс]: <https://help.peopleforce.io/ru/articles/8385275-общий-рейтинг-эффективности-и-коэффициент-компетенции>.

6. В.В. Подиновский. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra / В.В. Подиновский, М.А. Потапов. – Текст : электронный // Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra – 2013. – С. 3-6. – URL: <https://bijournal.hse.ru/data/2013/10/11/1281327437/5.pdf>.

References

1. "HR-tech in Emerging Markets: Results of 2022" [Electronic resource]: <https://hredtech.vc/research2022>.

2. "Rating of Russian HRM Systems 2024" [Electronic resource]: https://market.cnews.ru/news/top/2024-05-27_marketcnews_opublikoval_pervyj.

3. "Selection of HRM Systems from Suppliers" [Electronic resource]: <https://market.cnews.ru/service/hrm>.

4. "Comparison of HRM Systems from Suppliers" [Electronic resource]: https://www.cnews.ru/reviews/hrm-sistemy_2024/review_table/7867fdb24fae4c85d8fd6ea703d0ab78891131d9.

5. «Общий рейтинг эффективности и коэффициент компетенции» [Электронный ресурс]: <https://help.peopleforce.io/ru/articles/8385275-общий-рейтинг-эффективности-и-коэффициент-компетенции>

6. V.V. Podinovsky. The Weighted Sum Method in Multi-Criteria Decision Analysis: pro et contra / V.V. Podinovsky, M.A. Potapov. - Text: electronic // The Weighted Sum Method in Multi-Criteria Decision Analysis: pro et contra - 2013. - pp. 3-6. - URL: <https://bijournal.hse.ru/data/2013/10/11/1281327437/5.pdf>.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|--------------------------------|--|
| Косогоров Кирилл Станиславович | МИРЭА - Российский технологический университет, Институт информационных технологий, программист ПАО «Софтлайн», kosgor2001@yandex.ru |

Authors information

| Last name, first name, patronymic | Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors) |
|-----------------------------------|--|
| Kosogorov Kirill Stanislavovich | MIREA - Russian Technological University, Institute of Information Technologies, programmer of PJSC "Softline", kosgor2001@yandex.ru |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 23.11.2024 | одобрена после рецензирования 06.12.2024 | принята к публикации 19.12.2024 |
| the article was submitted 23.11.2024 | approved after reviewing 06.12.2024 | accepted for publication 19.12.2024 |

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМОВ КОНСЕНСУСА PROOF OF STAKE И PROOF OF WORK

Родион Дмитриевич Суцев

sushchev2002@gmail.com

МИРЭА – Российский технологический университет, проспект Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

Аннотация: В статье анализируются технологии распределённого реестра данных, широко известной как блокчейн. Представлена разработка системы, использующая механизм достижения консенсуса Proof of Stake (PoS), которая демонстрирует ряд преимуществ по сравнению с альтернативными реализациями, описанными в научной литературе. Предоставлены результаты оценки производительности системы в сравнении с существующими реализациями на базе Proof of Work (PoW), анализ и оценку нижеперечисленных алгоритмов

Ключевые слова: децентрализация, блокчейн, Proof of Stake, Proof of Work, сравнительный анализ.

Для цитирования: Суцев Р. Д. Анализ и оценка производительности алгоритмов консенсуса proof of stake и proof of work // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 43-48.

Original article

ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF PROOF OF STAYING AND PROOF OF WORK CONSENSUS ALGORITHMS

Rodion D. Sushchev

sushchev2002@gmail.com

MIREA - Russian Technological University, Vernadsky Ave., 78, Moscow, 119454, Russia

Abstract. This article analyzes distributed ledger technologies, commonly known as blockchain. The development of a system using the Proof of Stake (PoS) consensus mechanism is presented, which demonstrates a number of advantages over alternative implementations described in the scientific literature. The results of the system performance evaluation are provided in comparison with existing implementations based on Proof of Work (PoW), analysis and evaluation of the following algorithms

Keywords: decentralization, blockchain, Proof of Stake, Proof of Work, comparative analysis.

For citation: Sushchev R. D. Analysis and performance evaluation of proof of staying and proof of work consensus algorithms. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 43-48. (In Russ.).

Введение

В последние годы проблема разработки и совершенствования моделей и методов обработки персональных данных приобретает всё большее значение в условиях стремительного роста объемов информации и активного внедрения цифровых технологий в различные сферы жизни. Это обусловлено не только возрастающими требованиями к безопасности данных, но и необходимостью обеспечения их доступности, точности и конфиденциальности. Персональные данные становятся ключевым активом во многих отраслях, включая управление техническими процессами, финансовый сектор, здравоохранение, образование и, в перспективе, оборонную промышленность.

Различные разработки в данной области направлены на устранение множества критически важных проблем. Среди них наиболее остро стоят вопросы, связанные с мошенничеством при обработке персональных данных, их неправомерным использованием, утечками информации, а также сложностями, возникающими при

управлении большими массивами данных в распределённых системах. Современные вызовы, такие как рост количества кибератак, сложность обеспечения киберустойчивости систем и высокий уровень уязвимостей, требуют от исследователей и разработчиков комплексного подхода, сочетающего юридические, технические и организационные меры.

С одной стороны, значительные усилия направлены на развитие правового регулирования в области обработки персональных данных. Это включает принятие новых законодательных актов, разработку международных соглашений, регламентирующих защиту персональной информации, а также формирование национальных стратегий кибербезопасности. Эти меры призваны минимизировать риски, связанные с несанкционированным доступом к данным, и обеспечить защиту прав пользователей в цифровой среде.

С другой стороны, активны исследования в области технологических решений, способных предложить более безопасные и

эффективные подходы к обработке данных. Среди них выделяются инновационные механизмы, такие как применение блокчейн-технологий [1], которые демонстрируют значительный потенциал в повышении уровня безопасности, прозрачности и достоверности данных. Блокчейн позволяет использовать распределённые децентрализованные цифровые системы, обеспечивающие хранение данных в зашифрованном виде, публичную фиксацию истории операций в реестре и автоматизацию выполнения операций с помощью смарт-контрактов.

Традиционно в области обеспечения безопасности данных выделяют три основные модели: централизованную, объединённую и децентрализованную. Централизованные системы предусматривают управление данными из одного центра, что делает их уязвимыми для атак на центральный узел. Объединённые модели предлагают компромиссное решение, распределяя управление между несколькими узлами. Наиболее перспективным направлением является децентрализованная модель, которая лежит в основе блокчейн-систем. В ней все данные хранятся непосредственно у пользователей в зашифрованном виде, что минимизирует риски централизованного взлома.

Тем не менее, децентрализованные системы сталкиваются с рядом проблем, включая необходимость эффективного алгоритма достижения консенсуса [2]. При использовании систем с открытым исходным кодом, таких как блокчейны на базе механизма Proof of Work (PoW), выявляются существенные ограничения, связанные с высокой энергозатратностью и сравнительно низкой пропускной способностью. Для преодоления этих недостатков важно изучить альтернативные алгоритмы достижения консенсуса, такие как Proof of Stake (PoS) и другие современные разработки, которые способны обеспечить более устойчивую и экологичную работу распределённых систем.

В статье также говорится об исследовании альтернативных подходов к достижению консенсуса в блокчейн-сетях, разработка оптимизированного решения и создание прототипа механизма консенсуса, который может быть интегрирован в практические системы обработки персональных данных.

В любой распределённой системе существует задача достижения консенсуса, который представляет собой процесс согласования или принятия решения всеми узлами сети без наличия единого ведущего узла, что является ключевым аспектом обеспечения её устойчи-

вости и функциональности. Консенсус необходим для поддержания согласованности данных в условиях децентрализованной архитектуры, где множество участников системы взаимодействуют напрямую, без посредников. Данный процесс критически важен для правильного функционирования блокчейн-технологий, так как от него зависят как целостность данных, так и защита от атак злоумышленников.

На сегодняшний день разработано множество алгоритмов, позволяющих достичь консенсуса в распределённом реестре. Их разнообразие связано с возрастающей популярностью блокчейн-систем и стремлением решить ключевые проблемы, связанные с безопасностью, производительностью и энергоэффективностью. Алгоритмы консенсуса не только обеспечивают единство данных, но и определяют структуру взаимодействия узлов, скорость обработки транзакций и общую надёжность системы.

При проектировании надёжной блокчейн-системы выбор механизма консенсуса становится одной из важнейших задач. Этот выбор напрямую влияет на характеристики всей платформы, включая её устойчивость к различным атакам, масштабируемость и энергетическую эффективность. На сегодняшний день существует несколько популярных подходов, которые широко применяются в реальных проектах и зарекомендовали себя как работоспособные и эффективные решения. Среди них особенно выделяются два наиболее известных алгоритма: Proof of Work (PoW) и Proof of Stake (PoS).

Рассмотрим каждый из этих алгоритмов подробнее. Алгоритм Proof of Work (PoW) является одним из первых механизмов консенсуса, применённых в блокчейн-системах. Он получил широкую известность благодаря использованию в сети Bitcoin, которая стала первой успешной реализацией технологии блокчейна, продемонстрировав её жизнеспособность. Кроме того, PoW использовался в Ethereum на начальных этапах её функционирования. Суть данного алгоритма заключается в решении сложной математической задачи, которая требует значительных вычислительных ресурсов. Для нахождения решения, соответствующего заданным условиям, узлы сети, называемые майнерами, должны выполнять интенсивные вычисления, что делает процесс энергозатратным. Итогом является высокая стоимость поддержания сети и существенное потребление электроэнергии, которое в

масштабах крупных сетей может достигать уровня энергопотребления небольших государств.

Алгоритм Proof of Stake (PoS), в свою очередь, представляет собой альтернативный подход, направленный на решение проблем, присущих PoW. Этот механизм позволяет достигать консенсуса за счёт использования внутренней валюты сети вместо выполнения ресурсоёмких вычислений. Узлы сети, участвующие в процессе подтверждения блоков, выбираются пропорционально количеству принадлежащих им токенов. Такой подход значительно снижает энергозатраты и сокращает время, необходимое для генерации нового блока. Более того, PoS обладает лучшей масштабируемостью, что делает его предпо-

читательным выбором для современных блокчейн-систем, стремящихся к повышению производительности и устойчивости.

Таким образом, выбор алгоритма консенсуса определяется целями и требованиями конкретной системы, её масштабом и особенностями области применения. Усовершенствование этих алгоритмов остаётся актуальной задачей, поскольку их развитие открывает новые возможности для оптимизации децентрализованных систем [3]. Для более наглядного представления описываемых процессов на рисунке 1 приведена принципиальная схема взаимодействия компонентов системы, состоящая из четырёх элементов.

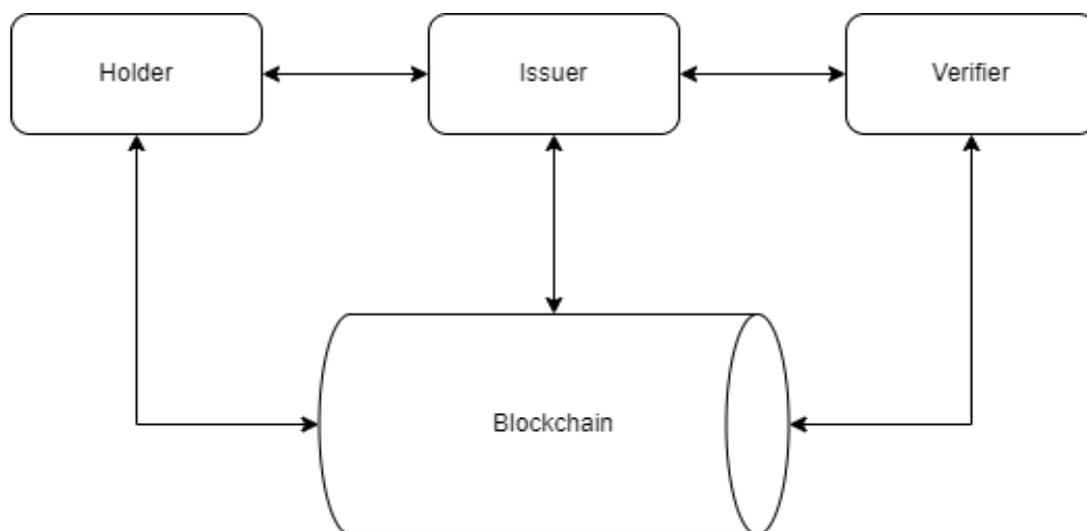


Рисунок 1. Схема взаимодействия компонентов системы

Figure 1. Diagram of the interaction of the system components

Для успешного функционирования системы, использующей децентрализованные идентификаторы (DID) и проверяемые учетные данные (Verifiable Credentials), критически важны несколько ключевых протоколов, от качества реализации которых зависит общая эффективность взаимодействия всех компонентов. Эти протоколы не только обеспечивают выполнение основных операций в системе, но и формируют её способность справляться с высокими нагрузками и большими объемами данных [4]. Особое внимание уделяется параметрам производительности, среди которых ключевыми являются скорость генерации блоков, время обработки запросов и общее количество транзакций в секунду. Эти параметры определяют, насколько система способна поддерживать оперативность, надёжность и масштабируемость.

Регистрация DID (Decentralized Identifier)

На этапе регистрации децентрализованного идентификатора издатель (Issuer) формирует токен, содержащий данные, необходимые для идентификации, и передаёт его в компонент, управляющий распределёнными идентификаторами. Этот процесс включает добавление информации в блокчейн, что делает его напрямую зависимым от скорости генерации новых блоков. Чем быстрее система обрабатывает новые блоки, тем оперативнее происходит регистрация идентификаторов, а значит, пользователи могут быстрее получить доступ к своим DID. Одновременно важным фактором является пропускная способность системы: чем больше транзакций в секунду она способна обработать, тем выше её устойчивость к высоким нагрузкам и большому числу одновременно выполняемых запросов.

Протокол регистрации Verifiable Credentials

Данный протокол отвечает за процесс, в ходе которого держатель децентрализованного идентификатора (Holder) регистрирует свои проверяемые учетные данные (VC) в системе. Этот этап особенно важен для обеспечения доступности данных для других участников сети. Высокая скорость генерации блоков является критически важным параметром, поскольку от неё зависит, насколько своевременно будет завершён процесс регистрации. Также важна устойчивость системы к перегрузкам: эффективная обработка большого числа запросов позволяет избежать задержек и сбоев в регистрации учетных данных, что особенно важно в условиях интенсивного использования.

Протокол верификации

Процесс верификации играет центральную роль в поддержании доверия к системе. На данном этапе компонент, именуемый Verifier, проверяет подлинность данных, предоставленных держателем учетных данных. Результаты верификации сохраняются в публичном распределённом реестре, что обеспечивает их доступность для всех участников сети. Основными критериями эффективности этого протокола являются скорость обработки запросов и пропускная способность системы. Быстрая и надёжная верификация минимизирует риск мошеннических действий и укрепляет доверие пользователей. Кроме того, высокая скорость верификации становится особенно актуальной в условиях многопользовательских систем с интенсивным обменом данными.

Значимость производительности и надёжности

Функционирование всей системы зависит от корректного проектирования и реализации описанных выше протоколов. Каждый из них предъявляет свои уникальные требования к параметрам производительности и надёжности, что обусловлено необходимостью достижения оптимальных результатов [5]. Быстрота и масштабируемость становятся ключевыми показателями успешности системы, обеспечивающими её способность работать в различных условиях, включая высокие нагрузки и интенсивные транзакции.

Ограничения выбора механизма достижения консенсуса

При разработке системы децентрализованной идентификации личности выбор меха-

низма достижения консенсуса имеет принципиальное значение. Такой механизм должен соответствовать требованиям надёжности, масштабируемости и предсказуемости, особенно с учётом того, что системы идентификации ориентированы на использование в государственных, технических и корпоративных сферах. В отличие от криптовалют, где внутренняя валюта является ключевым элементом, в системах децентрализованной идентификации она играет вспомогательную роль.

Механизм консенсуса в таких системах обычно включает несколько этапов:

Участник системы делает "ставку" — вносит определённое количество внутренней валюты, чтобы подтвердить своё участие в процессе.

Все ставки собираются в общий пул, где проводится голосование.

Участники добавляются в пул пропорционально внесённой сумме, что увеличивает вероятность их выбора.

Победитель выбирается псевдослучайным образом, после чего его узел признаётся корректным и получает право добавлять новый блок в цепочку.

Преимущества подхода для систем суверенной личности

Такой алгоритм позволяет минимизировать энергопотребление, исключив необходимость выполнения сложных математических вычислений, характерных для алгоритмов, таких как Proof of Work [6]. Вместо этого основное внимание уделяется предсказуемости и стабильности работы системы, что особенно важно для прикладных решений, используемых в технических или промышленных комплексах.

Системы децентрализованной идентификации могут быть реализованы как облачные решения для широкого использования или как автономные комплексы, подходящие для узкоспециализированных задач. Независимо от формы реализации, при проектировании таких систем особое внимание уделяется снижению энергозатрат и оптимизации производительности, что делает их максимально эффективными и удобными для различных областей применения.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе разработки блокчейн-системы был применён механизм достижения консенсуса Proof of Stake (PoS), который продемонстрировал существенное превосходство в производительности по сравнению с тра-

диционным алгоритмом Proof of Work (PoW). Одним из ключевых показателей эффективности является количество транзакций, обрабатываемых системой в секунду, что оказывает непосредственное влияние на пропускную способность и стабильность сети. В рамках настоящей работы проведён углублённый анализ увеличивающегося времени обработки транзакций в алгоритме PoW, где с ростом сложности задачи существенно возрастает время, необходимое для генерации нового блока [7]. Алгоритм PoW характеризуется возрастающими энергозатратами и значительными задержками при увеличении нагрузки.

В предложенном подходе, основанном на алгоритме PoS, время обработки транзакций осталось стабильным, даже при увеличении объёма данных до 5 миллионов транзакций. Было отмечено, что при выполнении 100 последовательных транзакций система демонстрировала производительность на уровне 20–30 транзакций в секунду, что существенно превосходит показатели алгоритма PoW, где начальная скорость составляет 7–10 транзакций в секунду и значительно падает с увеличением сложности задач. Этот результат доказывает, что система на базе PoS сохраняет свою эффективность независимо от объёмов входящих данных.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что выбранный подход позволяет избежать типичных для PoW проблем, связанных с ростом вычислительных затрат и увеличением времени отклика системы. Это делает алгоритм PoS предпочтительным для реализации систем, требующих высокой про-

пускной способности и устойчивости к нагрузкам, таких как платформы децентрализованной идентификации.

Выводы

В системах с децентрализованной идентификацией (DID) скорость обработки транзакций играет одну из ключевых ролей, особенно с учётом необходимости оперативного выполнения операций регистрации, верификации и обработки данных. Сравнительный анализ, проведённый в рамках настоящего исследования, показал, что алгоритм Proof of Stake обеспечивает значительно более высокую скорость добавления новых транзакций в блокчейн: 30 транзакций в секунду против 7 транзакций в секунду, характерных для алгоритма Proof of Work на начальном этапе его работы.

В дополнение к количественным показателям были рассмотрены аспекты надёжности, энергопотребления и масштабируемости. Эти данные подтверждают, что применение PoS обеспечивает более стабильную работу сети, снижает затраты на её эксплуатацию и минимизирует риски ухудшения производительности при увеличении нагрузки.

В целом, выбор механизма достижения консенсуса для системы децентрализованной идентификации основывается на балансе между высокой скоростью транзакций, стабильностью работы и низким энергопотреблением [8]. На основании проведённого анализа и полученных результатов алгоритм Proof of Stake был признан оптимальным решением для использования в таких системах.

Литература

1. Ельчинская, Н. С. Алгоритмы достижения консенсуса в блокчейн-системе / Н. С. Ельчинская, А. Ю. Исаев Программные продукты и системы. – 2019. – №. 4. – С. 59–66.
2. Агафонов, П. И. Блокчейн: проблемы и перспективы развития / П. И. Агафонов, Е. В. Левина Вестник Казанского технологического университета. – 2018. – №. 7. – С. 78–85.
3. Бурцев, Д. В. Обзор алгоритмов и технологий блокчейн / Д. В. Бурцев, М. С. Петров // Информационные технологии и системы. – 2020. – №. 2. – С. 45–50.
4. Колесников, А. Ю. Теоретические аспекты применения технологии блокчейн / А. Ю. Колесников, И. В. Назарова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2022. – №. 3. – С. 91–96.
5. Петренко, В. М. Проблемы и перспективы применения блокчейн-технологий в финансовых системах В. М. Петренко, А. Г. Курилов // Финансовые технологии и управление. – 2020. – №. 5. – С. 112–118.
6. Степанов, И. Н. Блокчейн в системах децентрализованной идентификации / И. Н. Степанов, М. В. Лебедев Журнал вычислительных технологий и систем. – 2021. – №. 8. – С. 33–40.
7. Николаев, В. М. Алгоритмы консенсуса в распределённых реестрах / В. М. Николаев, А. В. Сидоров Технологии в информационных системах. – 2019. – №. 12. – С. 72–79.
8. Власова, Т. Ю. Энергоэффективность блокчейн-сетей: Проблемы и решения / Т. Ю. Власова, П. И. Макаров // Журнал современных информационных технологий. – 2022. – №. 10. – С. 53–58.

References

1. Elchinskaya, N. S. Algorithms for achieving consensus in a blockchain system / N. S. Elchinskaya, A. Yu. Isaev Software products and systems. - 2019. - No. 4. - P. 59-66.
2. Agafonov, P. I. Blockchain: problems and development prospects / P. I. Agafonov, E. V. Levina Bulletin of Kazan Technological University. - 2018. - No. 7. - P. 78-85.
3. Burtsev, D. V. Review of blockchain algorithms and technologies / D. V. Burtsev, M. S. Petrov // Information technologies and systems. - 2020. - No. 2. - P. 45-50.
4. Kolesnikov, A. Yu. Theoretical aspects of the application of blockchain technology / A. Yu. Kolesnikov, I. V. Nazarova // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. - 2022. - No. 3. - P. 91-96.
5. Petrenko, V. M. Problems and prospects of applying blockchain technologies in financial systems V. M. Petrenko, A. G. Kurilov // Financial technologies and management. - 2020. - No. 5. - P. 112-118.
6. Stepanov, I. N. Blockchain in decentralized identification systems / I. N. Stepanov, M. V. Lebedev Journal of Computational Technologies and Systems. - 2021. - No. 8. - P. 33-40.
7. Nikolaev, V. M. Consensus Algorithms in Distributed Registries / V. M. Nikolaev, A. V. Sidorov Technologies in Information Systems. - 2019. - No. 12. - P. 72-79.
8. Vlasova, T. Yu. Energy Efficiency of Blockchain Networks: Problems and Solutions / T. Yu. Vlasova, P. I. Makarov // Journal of Modern Information Technologies. - 2022. - No. 10. - P. 53-58.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|--------------------------------|---|
| Сушчев Родион Дмитриевич | Бакалавр, МИРЭА – Российский технологический университет, студент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, sushchev2002@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) |
|-----------------------------------|---|
| Sushchev Rodion Dmitrievich | Bachelor's degree, MIREA - Russian Technological University, student of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, sushchev2002@gmail.com |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 25.11.2024 | одобрена после рецензирования 06.12.2024 | принята к публикации 18.12.2024 |
| the article was submitted 25.11.2024 | approved after reviewing 06.12.2024 | accepted for publication 18.12.2024 |

ГЕНЕАЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Сергей Николаевич Хонькин[✉] ¹ honkin@mirea.ru
Родион Дмитриевич Суцев ¹ sushchev2002@gmail.com

¹МИРЭА – Российский технологический университет, проспект Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

Аннотация. В статье рассматривается необходимость масштабной адаптации, обновления и разработки нового программного обеспечения для полноценного импортозамещения. Подчеркивается, что данный процесс требует значительных временных и ресурсных затрат, включая перекомпиляцию, тестирование и обучение пользователей. Особое внимание уделяется сложности переноса программного обеспечения с Windows на Linux из-за различий в архитектуре систем. Авторы отмечают, что для успешной реализации стратегии перехода на отечественные операционные системы необходимо обеспечить слаженное взаимодействие между разработчиками, организациями и государственными структурами.

Ключевые слова: Импортозамещение, операционные системы, Astra linux, Альт linux, дистрибутивы linux, российские операционные системы, программное обеспечение, защищенные системы

Для цитирования: Хонькин С. Н., Суцев Р. Д. Генеалогический анализ отечественных операционных систем // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 49-54.

Original article

GENEALOGICAL ANALYSIS OF DOMESTIC OPERATING SYSTEMS

Sergey N. Khonkin[✉] ¹ honkin@mirea.ru
Rodion D. Sushchev ¹ sushchev2002@gmail.com

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

Abstract. The article examines the need for large-scale adaptation, updating and development of new software for full-fledged import substitution. It is emphasized that this process requires significant time and resource costs, including recompilation, testing and user training. Particular attention is paid to the complexity of transferring software from Windows to Linux due to differences in the architecture of the systems. The authors note that for the successful implementation of the strategy of transition to domestic operating systems, it is necessary to ensure coordinated interaction between developers, organizations and government agencies.

Keywords: Import substitution, operating systems, Astra Linux, Alt Linux, Linux distributions, Russian operating systems, software, secure systems

For citation: Khonkin S. N., Sushchev R. D. Genealogical analysis of domestic operating systems. *Ingenerye tehnologii* = Engineering technologies. 2024; (4 (8)): 49-54. (In Russ.).

Введение

В настоящее время вопрос импортозамещения стал одним из наиболее актуальных для российского рынка информационных технологий. Массовый уход зарубежных компаний с российского рынка, а также прекращение поддержки их программного обеспечения на территории Российской Федерации создали значительные вызовы для многих отраслей, зависящих от иностранных технологий. Особенно остро эта проблема проявляется в сегменте операционных систем, где такие мировые лидеры, как Windows и macOS, занимали доминирующие позиции на протяжении десятилетий. Необходимость замены этих продуктов отечественными решениями становится стратегически важной задачей.

Для поиска эффективных альтернатив необходимо изучить текущие отечественные

разработки в области операционных систем и понять, какие из них способны конкурировать с мировыми лидерами [1]. При этом важно не только рассмотреть технические характеристики и функционал существующих российских ОС, но и провести историко-технический анализ развития операционных систем в целом, чтобы оценить их эволюцию и выявить ключевые элементы успешных платформ [2].

Исторический обзор развития операционных систем

История операционных систем тесно связана с развитием персональных компьютеров. Снижение стоимости оборудования, в частности дисплеев и процессоров, стало катализатором появления графических пользовательских интерфейсов (GUI), которые сделали использование компьютеров более доступным

для массового пользователя. Первыми шагами в этом направлении стало создание таких систем, как X Window System, которая до сих пор является стандартным компонентом Unix-подобных операционных систем [3].

Помимо Unix, значительный вклад в развитие GUI внесли операционные системы, разработанные в 1980-х и 1990-х годах, такие как:

Классические Mac OS и последующая macOS от Apple, ставшие эталоном для пользователей благодаря своему удобству и эстетике.

AmigaOS от Commodore, отличавшаяся высокой производительностью и богатством мультимедийных возможностей.

Atari TOS, ориентированная на любителей игр и мультимедиа.

IBM OS/2, созданная для профессионального использования в корпоративной среде.

Microsoft Windows, которая благодаря своей универсальности стала стандартом де-факто для большинства пользователей персональных компьютеров.

Эти системы стали наследниками концепций, заложенных в первом графическом интерфейсе, разработанном для компьютера Xerox Alto в исследовательском центре Xerox в Пало-Альто. Именно в начале 1970-х годов там была создана основа для современных GUI, которая затем была коммерциализирована крупными производителями в 1980-х и 1990-х годах [4].

Потенциал отечественных операционных систем

Для успешного импортозамещения необходимо учитывать не только богатую историю развития операционных систем, но и современные технологические вызовы. Российские разработчики могут использовать опыт и лучшие практики, накопленные мировыми лидерами, для создания конкурентоспособных платформ. Особое внимание стоит уделить следующим аспектам:

Современные операционные системы должны предлагать интуитивно понятный интерфейс и высокий уровень пользовательского опыта.

Обеспечение поддержки существующего программного обеспечения и интеграции с популярными сервисами является важным фактором для привлечения пользователей.

В условиях растущей киберугрозы системы должны иметь мощные встроенные механизмы защиты данных.

Оптимизация работы на различных типах оборудования позволит охватить широкий круг пользователей.

Российские операционные системы, такие как "Альт Линукс", "Роса", "Астра Линукс", уже демонстрируют положительные результаты в некоторых из этих направлений, но их развитие и масштабирование требуют существенных инвестиций и поддержки на государственном уровне.

Импортозамещение в сфере операционных систем — это не только необходимость, продиктованная текущими условиями, но и стратегический шаг в развитии отечественной IT-индустрии, позволяющий повысить её независимость и конкурентоспособность на мировом рынке.

Развитие операционных систем с конца 1990-х годов

С конца 1990-х годов на рынке персональных компьютеров уверенно доминировали три основные операционные системы: macOS от Apple Inc., Linux с открытым исходным кодом и Microsoft Windows. Эти платформы сформировали основу для работы большинства компьютеров, предопределив направление их развития на десятилетия вперед [5].

С появлением процессоров Intel в компьютерах Mac в 2005 году произошёл значительный сдвиг, который сблизил macOS с другими операционными системами, разрабатываемыми для архитектуры x86. Хотя в переходный период macOS сохраняла поддержку устаревших процессоров PowerPC вплоть до 2009 года, в итоге это решение способствовало унификации аппаратных платформ, что упростило разработку программного обеспечения для разных операционных систем.

Linux, благодаря своей открытости, продемонстрировал уникальную гибкость. Даже когда другие операционные системы постепенно прекращали поддержку менее популярных архитектур, Linux продолжал успешно портироваться на широкий спектр процессорных платформ. Среди них можно выделить как давно устаревшие и снятые с производства, такие как 68k, PA-RISC и DEC Alpha, так и платформы, которые сохранили своё применение в узкоспециализированных областях: SPARC и MIPS. Эти архитектуры по-прежнему находят своё применение в серверах, суперкомпьютерах и встроенных системах, хотя они уже не используются для настольных компьютеров.

В то же время другие операционные системы, такие как AmigaOS и OS/2, которые когда-то конкурировали за место под солнцем, практически исчезли из широкой эксплуатации. Тем не менее, эти системы продолжают

жить, но их использование ограничено узкими нишами. Они привлекают энтузиастов ретро-компьютинга, стремящихся сохранить наследие ранних технологий, либо находят применение в специализированных встроенных приложениях, где их архитектурные особенности всё ещё востребованы.

Таким образом, эволюция операционных систем с конца 1990-х годов демонстрирует, как рынок адаптировался к смене технологий, сосредоточившись на стандартизированных решениях для массового использования, но при этом сохранив возможности для энтузиастов и специализированных задач.

Развитие операционных систем для мобильных устройств в 1990-х годах

В начале 1990-х годов компания Psion представила новаторское устройство — Psion Series 3 PDA, которое стало одним из первых компактных мобильных вычислительных устройств. Устройство отличалось не только своими компактными размерами, но и функциональностью: пользователи могли создавать и запускать собственные приложения. В качестве операционной системы использовалась EPOC, которая в дальнейшем эволюционировала и стала известна как Symbian.

Symbian OS оказалась настоящим прорывом для мобильной индустрии. Она стала основой для работы множества мобильных телефонов таких известных брендов, как Nokia, Ericsson, Sony Ericsson, Motorola, Samsung, а также устройств, разработанных для NTT Docomo такими компаниями, как Sharp, Fujitsu и Mitsubishi. Благодаря своей универсальности и широкому распространению Symbian заняла лидирующие позиции на рынке смартфонов, став самой популярной операционной системой вплоть до 2010 года. Её наивысшая доля рынка была зафиксирована в 2006 году, когда Symbian управляла невероятными 74% мирового рынка смартфонов.

В это же время, в 1996 году, компания Palm Computing сделала важный шаг, выпустив устройства Pilot 1000 и Pilot 5000, работающие на базе Palm OS. Эти устройства задали новый стандарт для мобильных платформ, предлагая удобство в использовании и широкий набор функций, которые сделали их популярными среди деловых пользователей. Palm OS обеспечила стабильную основу для развития индустрии портативных устройств, впоследствии став предшественником многих современных решений [6].

Microsoft не осталась в стороне от стремительно развивающегося рынка мобильных опе-

рационных систем. В 1996 году компания представила Windows CE, которая впоследствии легла в основу платформы Pocket PC 2000. В 2003 году операционная система была переименована в Windows Mobile, став ключевым решением для смартфонов. На пике популярности в 2007 году Windows Mobile была самой распространённой операционной системой для смартфонов в США, обеспечивая стабильность, производительность и поддержку приложений, которые привлекали широкий круг пользователей.

Таким образом, 1990-е годы стали периодом интенсивного развития мобильных операционных систем, закладывающим фундамент для современной мобильной индустрии. Такие системы, как Symbian, Palm OS и Windows Mobile, не только расширили функциональные возможности мобильных устройств, но и стали отправной точкой для будущих технологических достижений.

Начало пути к независимости от иностранного программного обеспечения

В начале 2010-х годов в Российской Федерации остро встал вопрос о необходимости снижения зависимости от иностранного программного обеспечения, что связано с угрозами национальной безопасности и устойчивости критической инфраструктуры. Этот вопрос впервые был поднят на уровне государственных инициатив и в 2014 году получил законодательное закрепление [7]. Введённые ограничения предусматривали запрет на использование зарубежного ПО в государственных учреждениях и ведомствах. Таким образом, был заложен фундамент для активного развития отечественного программного обеспечения, в частности, операционных систем, которые могли бы заменить зарубежные аналоги.

С этого момента на российском рынке начали появляться различные операционные системы отечественной разработки, призванные обеспечить безопасность, соответствовать требованиям национальной инфраструктуры и снизить зависимость от иностранных технологий. Большинство российских операционных систем базируются на ядре Linux, что объясняется рядом причин. Linux является свободным и открытым программным обеспечением, позволяющим разработчикам адаптировать и модифицировать его под конкретные задачи и требования. Это делает использование Linux оптимальным решением для обеспечения технологической независимости при сравнительно низких затратах.

Среди отечественных разработок особое внимание уделяется полноценным опера-

ционными системам, которые могут предложить решения как для рабочих станций, так и для серверной инфраструктуры. Такие системы обладают значительным потенциалом для замены Windows и других зарубежных ОС. Помимо функциональности и производительности, они проходят сертификацию для работы с данными, содержащими коммерческую или государственную тайну, что делает их привлекательными для использования в стратегически важных секторах, таких как государственное управление, оборона и крупный бизнес.

Примеры таких систем включают в себя продукты, разработанные с учётом специфики российского законодательства и стандартов безопасности. Эти операционные системы предлагают совместимость с существующим программным обеспечением, удобные графические интерфейсы и стабильную производительность [8]. Некоторые из них уже активно используются в государственных структурах и коммерческих организациях, демонстрируя, что Россия может успешно развивать альтернативы западным решениям.

Таким образом, с 2014 года вектор развития отечественных операционных систем стал ключевой частью стратегии импортозамещения в сфере информационных технологий. Эти усилия направлены на создание надёжных и конкурентоспособных решений, которые способны обеспечить технологическую независимость страны в условиях ограниченного доступа к иностранным технологиям.

Astra Linux: Лидер в области защиты информации

Операционная система Astra Linux, разработанная компанией АО «НПО РусБитех», создавалась с чёткой целью — обеспечить высочайший уровень защиты информации. Эта ОС имеет сертификацию, позволяющую обрабатывать данные с грифом «совершенно секретно». Такое признание стало возможным благодаря соответствию требованиям российских органов, включая ФСТЭК, ФСБ и Минобороны РФ, что делает Astra Linux уникальным продуктом для государственных и военных структур. С 2018 года все компьютеры, задействованные в оборонной и военной сфере, полностью переведены на использование Astra Linux, что подчёркивает доверие к этой системе на самом высоком уровне.

Кроме того, разработчики Astra Linux активно участвуют в международных сообществах, таких как Linux Foundation и The Document Foundation, что позволяет системе

оставаться конкурентоспособной и интегрированной в глобальные процессы развития ПО [9]. Основное предназначение этой ОС — обработка информации в режиме повышенной защиты, что делает её незаменимой для критически важных отраслей.

Интересной особенностью Astra Linux является её гражданский аналог — Astra Linux Common Edition. Эта версия предназначена для общего использования и адаптирована для более широкого круга задач. Интерфейс гражданской версии системы заметно отличается от привычных Linux-дистрибутивов и больше напоминает Windows, что облегчает переход пользователей на эту платформу. Более того, Astra Linux адаптирована для сенсорных экранов, что расширяет её возможности, включая использование на мобильных устройствах. Широкая техническая поддержка 24/7, готовая инфраструктура и развитая экосистема совместимых решений делают Astra Linux одной из самых популярных систем в рамках стратегии импортозамещения.

Альт: Универсальная система с глубокой проработкой

Операционная система Альт, разработанная компанией «Базальт СПО», представляет собой ещё одного яркого представителя отечественного ПО. Её разработчики сосредоточились на создании собственного Linux-дистрибутива, который со временем стал одним из самых востребованных среди российских пользователей. Основным преимуществом Альта является обширная поддержка, которая включает не только техническую помощь, но и активное сообщество пользователей.

Отличительной чертой Альта является наличие собственного репозитория, а также чрезвычайно подробной документации и мануалов по продукту. Это делает систему удобной как для специалистов, так и для новых пользователей. Особо стоит отметить, что Альт значительно ушёл от своей базы, изначально представлявшей собой Mandrake. Настолько, что изначальный дистрибутив в новом продукте уже не распознать. В отличие от конкурентов, таких как Astra Linux (основанной на Debian) и ROSA, Альт стал полностью самостоятельной системой [10]. Это позволяет ей быть гибкой, масштабируемой и удовлетворять широкий спектр потребностей.

РОСА: Надёжность в защите данных

Компания «НТЦ ИТ РОСА» выделилась созданием дистрибутивов, ориентированных на обеспечение безопасности информации.

Продукты этой компании делятся на две основные линейки:

РОСА «КОБАЛЬТ» — система для защиты коммерческой тайны. Она сертифицирована ФСТЭК России как в настольной, так и в серверной версиях.

РОСА DX «НИКЕЛЬ» — предназначена для работы с государственной тайной с грифом «не выше секретно».

Для частных пользователей и менее требовательных задач компания предлагает свободную и бесплатную операционную систему ROSA Fresh, которая идеально подходит для домашнего использования.

Разделение дистрибутивов на защищённые и незащищённые версии позволяет компании охватывать как профессиональный, так и массовый сегмент рынка [11]. РОСА демонстрирует высокую надёжность и универсальность, что делает её важным игроком среди отечественных операционных систем.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотренные российские дистрибутивы обладают рядом схожих черт, но каждая система имеет свои уникальные особенности и преимущества. Astra Linux, например, выделяется стремлением разработчиков сделать интерфейс максимально похожим на Windows, что существенно облегчает переход для пользователей, привыкших к привычной рабочей среде. Это решение особенно актуально для сотрудников госучреждений и компаний, где привыкли к интерфейсу Windows, и минимизация дискомфорта при переходе на новую систему становится важным фактором.

Альт, в свою очередь, имеет сильное преимущество в виде активного и сплочённого сообщества, которое предоставляет оперативную поддержку и делится наработками. Наличие качественной документации и подробных мануалов также играет важную роль, упрощая процесс освоения системы и её интеграции в существующую инфраструктуру.

Тем не менее, полностью заменить Windows на сегодняшний день не способна ни одна из существующих российских ОС. Это связано с тем, что значительная часть программного обеспечения, особенно специализированного или используемого в государственных учреждениях, не имеет аналогов, совместимых с Linux. Некоторые из таких программ разрабатывались исключительно под Windows на протяжении многих лет, что создаёт серьёзные трудности при их адаптации для других платформ.

Выводы

Для полноценного импортозамещения потребуется провести масштабную работу по адаптации, обновлению и созданию нового ПО, которое сможет заменить существующие решения. Это долгий и ресурсозатратный процесс, включающий перекомпиляцию, тестирование и обучение пользователей. Также необходимо учитывать, что далеко не все программы на Windows могут быть легко перенесены на Linux из-за различий в архитектуре систем. Таким образом, для успешной реализации стратегии перехода на отечественные операционные системы потребуется слаженное взаимодействие разработчиков, организаций и государства.

Литература

1. Багринцев, В. В. Импортозамещение программного обеспечения в Российской Федерации: перспективы и вызовы / В. В. Багринцев, М. И. Суворов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2022. – № 2. – С. 12-18.
2. Иванов, А. Н. Актуальные вопросы разработки отечественных операционных систем / А. Н. Иванов, И. П. Михайлов // Журнал "Открытые системы. СУБД". – 2021. – № 4. – С. 34-39.
3. Петров, Ю. А. Проблемы и перспективы создания защищённых операционных систем в России / Ю. А. Петров, Е. С. Носков // Информационная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 5-10.
4. Тихонов, П. Н. Использование Linux-дистрибутивов как основы для создания российских операционных систем / П. Н. Тихонов // Вестник РАН. – 2021. – № 5. – С. 45-50.
5. Кузнецов, С. В. Экосистема российских ОС: анализ текущего состояния и пути развития / С. В. Кузнецов, А. П. Беляев // Программные продукты и системы. – 2022. – № 3. – С. 22-28.
6. Кравченко, И. А. Развитие отечественных операционных систем: вызовы и решения / И. А. Кравченко, В. П. Новиков // Современные информационные технологии. – 2023. – № 4. – С. 14-20.
7. Лебедев, М. В. Проблемы и пути совершенствования российских операционных систем / М. В. Лебедев, Д. И. Тарасов // Научно-технический вестник. – 2022. – № 1. – С. 38-44.
8. Чернышев, А. В. Адаптация российских операционных систем к требованиям безопасности данных / А. В. Чернышев, Н. И. Воронов // Безопасность информационных технологий. – 2021. – № 2. – С. 49-55.

9. Мельников, А. Ю. Перспективы развития альтернативных операционных систем в России / А. Ю. Мельников, К. А. Давыдов // Журнал прикладных информационных технологий. – 2022. – № 5. – С. 72-77.
10. Сорокин, В. С. Интеграция российских ОС в корпоративную IT-инфраструктуру / В. С. Сорокин, Л. Ю. Борисова // Технические науки. – 2021. – № 7. – С. 80-85.
11. Федоров, В. А. Экономические и социальные аспекты импортозамещения в сфере операционных систем / В. А. Федоров, О. В. Васильева // Экономика и инновации. – 2023. – № 3. – С. 57-63.

References

1. Bagrintsev, V. V. Import substitution of software in the Russian Federation: prospects and challenges / V. V. Bagrintsev, M. I. Suvorov // Information technologies and computing systems. - 2022. - No. 2. - P. 12-18.
2. Ivanov, A. N. Actual issues of development of domestic operating systems / A. N. Ivanov, I. P. Mikhailov // Journal "Open Systems. DBMS". - 2021. - No. 4. - P. 34-39.
3. Petrov, Yu. A. Problems and prospects of creating secure operating systems in Russia / Yu. A. Petrov, E. S. Noskov // Information security. - 2020. - No. 1. - P. 5-10.
4. Tikhonov, P. N. Using Linux Distributions as a Basis for Creating Russian Operating Systems / P. N. Tikhonov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. - 2021. - No. 5. - P. 45-50.
5. Kuznetsov, S. V. Ecosystem of Russian OS: Analysis of the Current State and Development Paths / S. V. Kuznetsov, A. P. Belyaev // Software Products and Systems. - 2022. - No. 3. - P. 22-28.
6. Kravchenko, I. A. Development of Domestic Operating Systems: Challenges and Solutions / I. A. Kravchenko, V. P. Novikov // Modern Information Technologies. - 2023. - No. 4. - P. 14-20.
7. Lebedev, M. V. Problems and ways to improve Russian operating systems / M. V. Lebedev, D. I. Tarasov // Scientific and technical bulletin. - 2022. - No. 1. - P. 38-44.
8. Chernyshev, A. V. Adaptation of Russian operating systems to data security requirements / A. V. Chernyshev, N. I. Voronov // Information technology security. - 2021. - No. 2. - P. 49-55.
9. Melnikov, A. Yu. Prospects for the development of alternative operating systems in Russia / A. Yu. Melnikov, K. A. Davydov // Journal of Applied Information Technologies. - 2022. - No. 5. - P. 72-77.
10. Sorokin, V. S. Integration of Russian OS into the corporate IT infrastructure / V. S. Sorokin, L. Yu. Borisova // Technical sciences. - 2021. - No. 7. - P. 80-85.
11. Fedorov, V. A. Economic and social aspects of import substitution in the field of operating systems / V. A. Fedorov, O. V. Vasilyeva // Economy and innovation. - 2023. - No. 3. - P. 57-63.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|---------------------------|--|
| Хонькин Сергей Николаевич | кандидат исторических наук, МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), доцент кафедры связи ВУЦ (Военный учебный центр) при РТУ МИЭА, honkin@mirea.ru |
| Суцнев Родион Дмитриевич | Бакалавр, МИРЭА – Российский технологический университет, студент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий, sushchev2002@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) |
|-----------------------------------|--|
| Khonkin Sergey Nikolaevich | PhD in History, MIREA - Russian Technological University (RTU MIREA), Associate Professor of the Department of Communications of the Military Training Center (MTC) at RTU MIREA, honkin@mirea.ru |
| Sushchev Rodion Dmitrievich | Bachelor's degree, MIREA - Russian Technological University, student of Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies, sushchev2002@gmail.com |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 25.11.2024 | одобрена после рецензирования 07.12.2024 | принята к публикации 19.12.2024 |
| the article was submitted 25.11.2024 | approved after reviewing 07.12.2024 | accepted for publication 19.12.2024 |

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕДКИХ СОБЫТИЙ ДЛЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ

Андрей Леонидович Бескин ✉ 1 beskin@mirea.ru
Татьяна Романовна Игонина 1 t-igonina@mail.ru
Владимир Михайлович Кесельман 1 vmkes@yandex.ru
Ольга Ригасовна Параскевопуло 1 paraskevopulo@mirea.ru

¹МИРЭА – Российский технологический университет, проспект Вернадского, д. 78, Москва, 119454, Россия

Аннотация. Предложен метод ускорения испытания моделей отказоустойчивых систем, основанный на незначительной модификации кода существующих программ имитационного моделирования дискретных систем и их параллельного исполнения в распределенной вычислительной среде под управлением менеджера модельных испытаний. В качестве программы моделирования был выбран сверхбыстродействующий эмулятор сетей Петри собственной разработки. Используются модели отказоустойчивых вычислительных систем и операционных систем на сетях Петри.

Ключевые слова: редкие события в системе, распределенная среда моделирования, сети Петри, уровни отказоустойчивости систем, стандарты распределённых систем моделирования, управление испытаниями моделей.

Для цитирования: Бескин А. Л., Игонина Т. Р., Кесельман В. М., Параскевопуло О. Р. Распределенное моделирование редких событий для отказоустойчивых систем // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 55-65.

Original article

DISTRIBUTED SIMULATION OF RARE EVENTS FOR FAULT-TOLERANT SYSTEMS

Andrey L. Beskin ✉ 1 beskin@mirea.ru
Tatyana R. Igonina 1 t-igonina@mail.ru
Vladimir M. Keselman 1 vmkes@yandex.ru
Olga R. Paraskevopulo 1 paraskevopulo@mirea.ru

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

Abstract. A method for accelerating the testing of fault-tolerant systems models is proposed, based on a minor modification of the code of existing programs for simulation of discrete systems and their parallel execution in a distributed computing environment under the control of a model test manager. An ultra-fast Petri net emulator was chosen as the simulation program. Models of fault-tolerant computing systems and operating systems on Petri nets are used.

Keywords: rare events in the system, distributed modeling environment, Petri nets, fault tolerance levels of systems, standards of distributed modeling systems, model test management.

For citation: Beskin A. L., Igonina T. R., Keselman V. M., Paraskevopulo O. R. Distributed simulation of rare events for fault-tolerant systems. *Ingenerynye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 55-65. (In Russ.).

Введение

Имитационное моделирование остается важным инструментом в разработке и исследовании сложных дискретных систем, таких как аппаратные схемы компьютеров и модули системного программного обеспечения. Особенно актуален этот метод в создании и поддержке жизненного цикла систем с повышенными требованиями надежности. История анализ причин катастроф сложных технических систем показала, что подобные катастрофы случаются при совпадении во времени нескольких редких событий. Сбор статистики мало полезен, т.к. катастрофы случаются крайне редко и их причины сложно систематизировать.

Имитационное моделирование позволяет эмулировать миллионы сценариев катастроф за приемлемое время вычислений, определить вероятность сочетания сбоев и частичных отказов систем, приводящих к катастрофам, выявить зависимость вероятности катастроф от частоты и характера сбоев. На этапе проектирования модели позволяют определить требования к надежности элементов системы, степень избыточности ресурсов, оптимальные логические схемы, исходя из общих требований к производительности и отказоустойчивости системы.

Технология имитационного моделирования предусматривает несколько этапов. В статье рассматривается этап проведения модельных статистических экспериментов как

наиболее ресурсоемких и требующих большого времени вычислений. При моделировании редких событий, таких как отказы надежных систем требуется выполнить огромное число прогонов модели для получения достоверной оценки вероятности отказа. Если в требованиях к системе указана надежность «пять девяток» или выше (вероятность безотказной работы 99.999% в течение заданного времени), задача проведения испытаний модели становится неразрешимой из-за неприемлемого времени при ее решении на одном, даже очень мощном компьютере.

Предлагается технология распределенного моделирования в локальной компьютерной сети или в интернет, которая позволяет ускорить этап испытаний в десятки и сотни раз.

Стандарты распределенных систем моделирования

Системы распределенных вычислений и моделирования появились в 60-х годах прошлого века. Наиболее известный проект, в котором участвовали 5 млн. пользователей – SETI, анализ радиосигналов из космоса для определения разумной информации. Специально для SETI@Home специалисты университета Беркли разработали платформу для распределенных вычислений BOINC, которая по сей день применяется в распределенных исследованиях [1].

Более современное действующее сетевое сообщество, World Community Grid, применяется в основном для поиска методов лечения СПИДа и COVID-19 [2]. Использует программное обеспечение AutoDock, работает также на платформе BOINC.

Стандарты распределенных систем моделирования были разработаны в военных проектах в США, а потом обобщены [3]:

1. HLA (High-Level Architecture): Разработанный Объединенным исследовательским центром (UARC) США, HLA - это стандарт, описывающий архитектуру и протоколы для построения распределенных симуляционных систем. HLA обеспечивает стандартизированный способ интеграции и взаимодействия различных моделей и симуляторов.

2. DIS (Distributed Interactive Simulation): DIS - это стандарт для моделирования боевых действий в реальном времени, разработанный

Министерством обороны США. Он определяет форматы сообщений и протоколы для обмена данными между участниками симуляции.

3. IEEE Distributed Simulation Standards Committee (DSSC): Этот комитет разрабатывает и поддерживает стандарты для распределенного моделирования, включая HLA. Он играет ключевую роль в развитии и поддержке стандартов, способствуя их распространению и применению.

Использование этих стандартов в российских проектах в настоящее время ограничено по разным причинам, включая санкции и сложность реализации. Альтернатива – использование открытых стандартов и библиотек параллельного программирования (MPI, gRPC) и современных языков программирования (Go, Python).

Программа имитационного моделирования на сетях Петри

В качестве программы для проведения испытаний распределенного моделирования была выбрана QPNet версий 1.2 и 1.3.2, разработанная под руководством автора [4]. Ее отличает исключительное быстродействие, нетребовательность к ресурсам компьютера, портативность, открытый код. Для нее были разработаны многие модели, включая отказоустойчивые блоки бортовых ЭВМ и модели операционных систем. Программа может запускаться в нескольких экземплярах на одном компьютере в зависимости от числа процессорных ядер и потоков. Пример выполнения 5 экземпляров программ с тестовой моделью на рисунках 1 и 2.

Испытания проводились на современном моноблоке ICL с 10-поточным процессором Intel Core i5-10400. Нагрузка процессора в ходе 6 часов испытаний не превышала 60%, но его частота колебалась в диапазоне 2,9-3,9 ГГц из-за перегрева. Затраты оперативной памяти минимальны: не более 57 МБ на один экземпляр программы+ моделирования. Дисковая память не используется, чем отчасти объясняется беспрецедентная скорость моделирования.

Использовалась программа QPNet 1.3.2, время проведения эксперимента 2 часа 20 минут. Результат получился следующий (таблица 1):

Таблица 1. Результат эксперимента с пятью параллельными испытаниями

Table 1. The result of an experiment with five parallel trials

| № п/п | Лет / Years | Каток (тыс.) / Skating Rink (thousand) | Игры (тыс.) / Games (thousand) | Кафе (тыс.) / Cafes (thou- sand) | Аварии / Accidents | Проверки / Inspections | Довольные (тыс.) / Satis- fied (thousand) | Недовольные (тыс.) / Dissatisfied (thousand) | Доля (%) довольных / Share (%) of satisfied | Тактов QPNet 1.3.2 / QPNet Clock Cycles 1.3.2 |
|----------|-------------|---|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------|--|---|--|--|
| 1 | 327 | 1228307,365 | 479541,941 | 1116078,039 | 506 | 1017 | 2823927,345 | 292929,909 | 90,60 | 20.351608.402 |
| 2 | 351 | 1320976,933 | 515946,195 | 1200233,712 | 535 | 1094 | 3037156,840 | 314925,264 | 90,61 | 21.887.359.505 |
| 3 | 374 | 1404816,572 | 549049,222 | 1276463,741 | 553 | 1163 | 3230329,535 | 334398,15 | 90,62 | 23.276.087.326 |
| 4 | 315 | 1183218,438 | 461802,054 | 1075046,582 | 493 | 980 | 2720067,074 | 282401,802 | 90,59 | 19.604.571.816 |
| 5 | 304 | 1141629,565 | 446171,408 | 1037345,877 | 451 | 945 | 2625146,850 | 271772,048 | 90,62 | 18.915.431.205 |

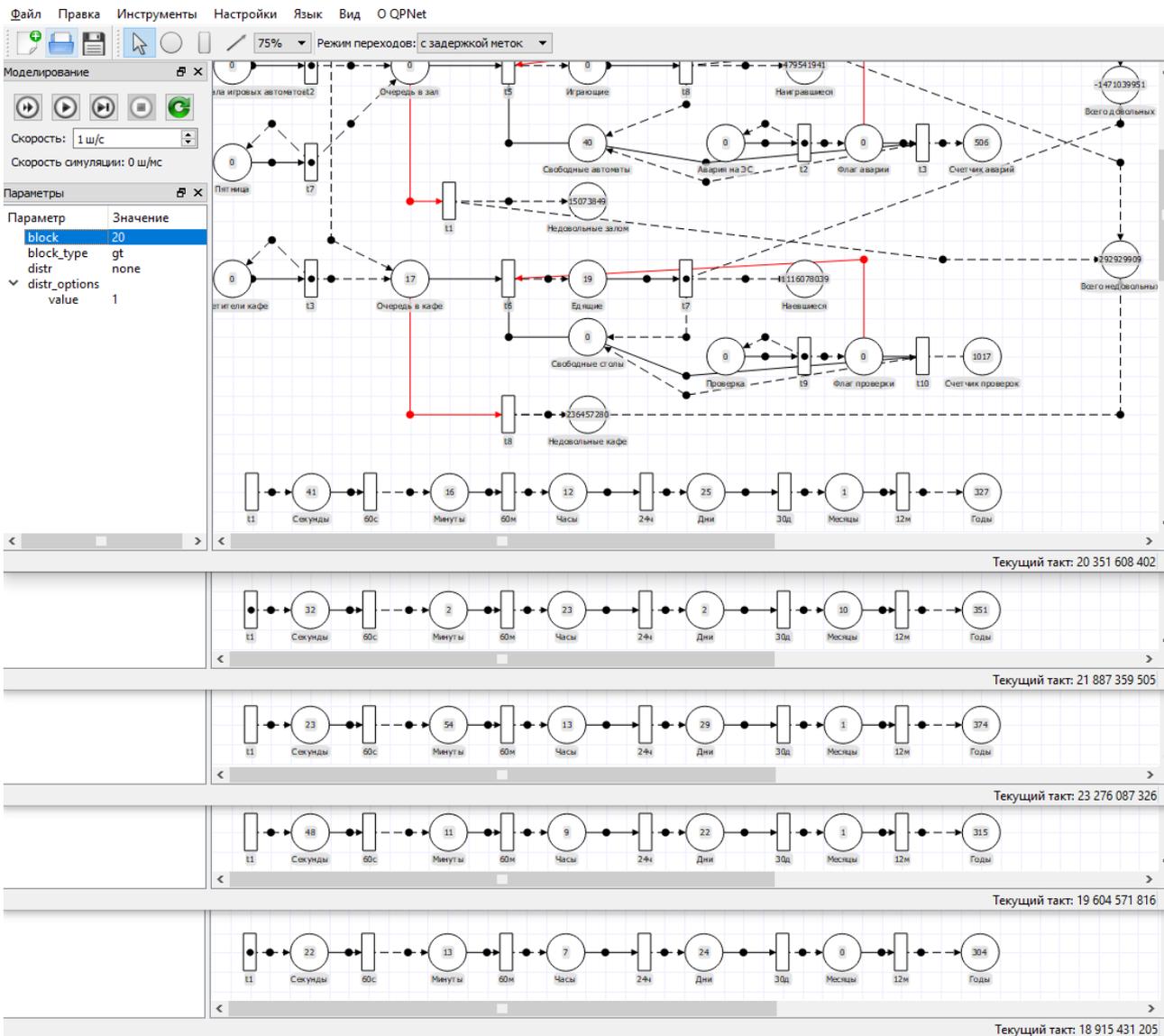


Рисунок 1. Результат оценки производительности на пяти параллельных испытаниях тест-модели

Figure 1. The result of the performance evaluation on five parallel tests of the test model

По таблицам распределения Стьюдента для степени свободы 4 ($= 5-1$) определяем доверительный интервал оценки среднего результата с достоверностью 99%. Получаем среднее 90,608% плюс-минус 0,027%.

Каждый из пяти прогонов модели состоял в обслуживании случайных потоков заявок на трех конвейерах (каток, игровой зал, кафе) со случайными временами этапов в условиях случайных сбоев (аварии и проверки). Эксперимент подтвердил высочайшую скорость эмуляции (более 104 млрд. тактов моделирования за 2 часа 20 минут на среднем по мощности компьютере). Также была получена высокая точность результата (отклонение $\pm 0,027\%$ с достоверностью 99%).

В распределенной системе моделирования может быть получен результат с более высокой точностью и достоверностью. Время эксперимента также будет существенно меньше.

Второй эксперимент проводился с программой QPNet 1.2, в которой прогоны модели автоматически повторяются до достижения заданных критериев. В данном случае были определены два критерия: число обслуженных заявок (довольные) достигло 500 (успех) или число необслуженных (недовольные) достигло 5 (отказ). Модель использовалась как тестовая для проверки применимости методики к испытаниям моделей сверхнадежных систем.

Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2. Результаты испытаний тестовой модели в QPNet 1.2

Table 2. Test results of the test model in QPNet 1.2

| № п/п | Успехов / Success | Отказов / Failure | Процент успехов / Percentage of success |
|-------|-------------------|-------------------|---|
| 1 | 9333941 | 39 | 99,99958 |
| 2 | 8097689 | 21 | 99,99974 |
| 3 | 9359361 | 36 | 99,99962 |
| 4 | 9998259 | 42 | 99,99958 |
| 5 | 10054121 | 38 | 99,99962 |

Таким образом была подтверждена возможность испытания моделей систем с требуемым показателем надежности 99.999% и выше. Тестовая модель требовала 3-4 тысячи тактов модельного времени на один прогон. Скорость моделирования составляла около 1000 прогонов в секунду в каждом из 5 параллельных сеансов моделирования.

Среднее значение процента успехов составило 99,99963. По таблицам распределения Стьюдента для 4 степеней свободы определен доверительный интервал оценки: $\pm 0,00014\%$ с достоверностью 99%. Для более высокой достоверности, 99,9% доверительный интервал составил $\pm 0,00025\%$. Таким образом, модель тестовой системы показала уровень безотказности «пять девяток» в сравнительно коротком эксперименте (2 часа 20 минут).

Модели реальных систем могут требовать на много порядков больше тактов на один прогон, например, модель бортового вычислителя с реальным временем такта 1с и требуе-

мым временем безотказной работы 10 лет в условиях случайных сбоев будет работать свыше 300 млн. модельных тактов, т.е. более 100 тыс. секунд (более суток). Для получения достоверной оценки на уровне «три девятки» необходимо провести от 5 до 10 испытаний по миллиону прогонов в каждом, около 3 тысяч лет на каждое испытание.

Выход из такой ситуации – огрубление модели, снижение требований по надежности системы и достоверности оценок, как правило неприемлем. Другой вариант – распараллеливание испытаний с использованием возможностей современной компьютерной техники и автоматизации процесса. Топовые центральные процессоры для десктопов имеют 32 потока, на них можно запускать 12-15 экземпляров программы QPNet в фоне, без заметных помех в текущей работе. В компьютерном классе или лаборатории обычно устанавливают по 30 десктопов. В такой локальной сети может параллельно работать 350-450 этих программ.

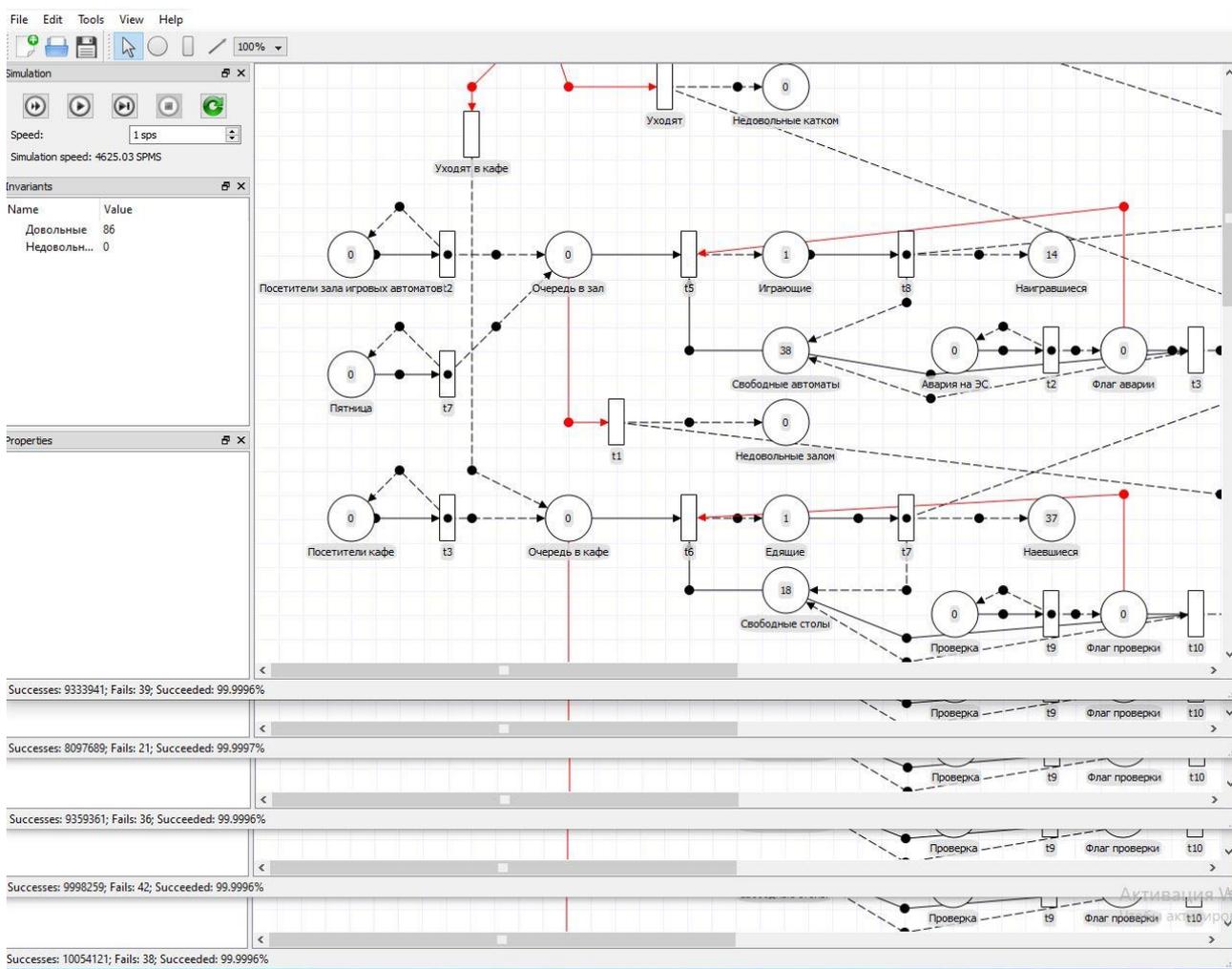


Рисунок 2. Оценка применимости методики для высоконадежных систем

Figure 2. Assessment of the applicability of the methodology for highly reliable systems

Однако простое распараллеливание не решает проблему длительных прогонов (более суток в приведенном выше примере). Необходимо модернизировать организацию статистических испытаний с использованием специальных программных средств. Также можно ограничить число прогонов в испытании – до первого отказа, а результаты обработать аналитически, считая закон распределения отказов близким к известному математическому.

Проект платформы распределенного моделирования

Первое, что необходимо сделать в подобном проекте – доработать исходный код целевого приложения моделирования, в нашем случае – QPNet, для коммуникаций с управляющей программой. Учитывая, что QPNet – проект с открытым кодом, сделать это было несложно, вставив функции MPI для передачи

сообщений о значениях двух целочисленных переменных (числа успехов и отказов).

Второе – написать код управляющего модуля, который будет запускать заданное количество симуляций заданного файла модели с помощью процессов MPI. Также необходимо написать служебные модули, в том числе для сбора и отображения текущих результатов моделирования.

Третье – сделать удобный интерфейс для управления и наблюдения за процессами симуляций.

Четвертое – сохранение результатов и их статистический анализ (в том числе, оценка показателя эффективности с доверительным интервалом)

Ниже представлена схема экспериментальной децентрализованной системы моделирования с использованием технологии блокчейн (рисунок 3).

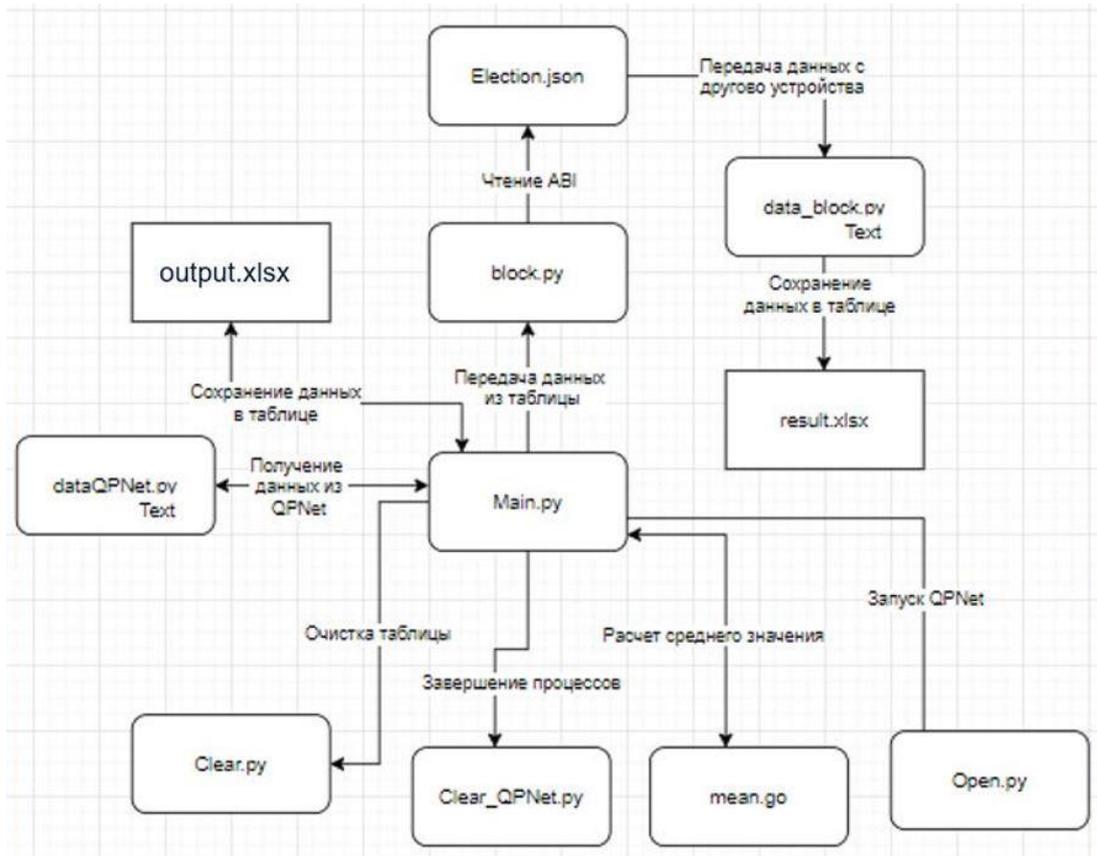


Рисунок 3. Схема работы ПО системы распределенного моделирования

Figure 3. The scheme of operation of the software of the distributed modeling system

Назначение модулей системы:

- main.py - приложение для управления процессами;
- clear.py - очистка таблицы при запуске программы;
- Clear_QPNet.py - завершение процессов;
- mean.go - расчет среднего значения;
- Open.py - запускает QPNet;
- dataQPNet.py - получение данных из QPNet;

- block.py - получение и передача данных, необходимы для передачи в децентрализованную систему;
- Election.json - читает ABI и запускает выполнение смарт-контракта data_block.py - получение данных после выполнения смарт-контракта output.xlsx и result.xlsx используются для хранения результатов

Схема интерфейса представлена на рисунках 4, 5.

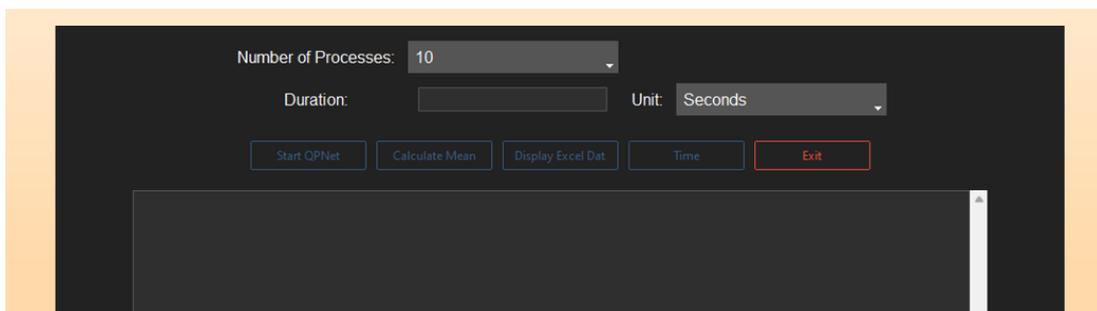


Рисунок 4. Интерфейс управления

Figure 4. Management Interface

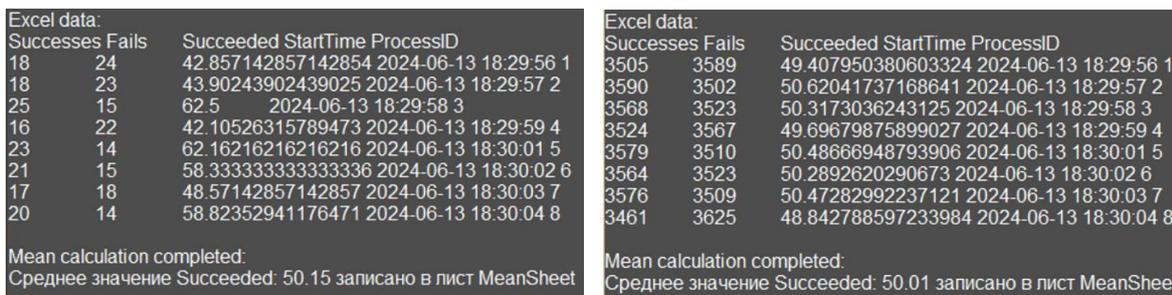


Рисунок 5. Интерфейс наблюдения: через 1 минуту, через 2 часа

Figure 5. Monitoring interface: after 1 minute, after 2 hours

Особенность данной реализации – использование стандартного приложения MS Excel для сбора и обработки результатов моделирования.

Применение технологии блокчейн в опытной системе показало возможность проведение экспериментов в защищенной сетевой среде. Но в условиях локальной сети, не подключенной к интернет, более эффективна по производительности схема без смарт контрактов (при сохранении конфиденциальности моделей и результатов испытаний).

Опытная реализация показала работоспособность простой схемы распределенного моделирования. Но проблему длительности отдельных прогонов моделей долгоживущих надежных систем она не решает. Нужен новый подход к проведению статистических испытаний, требующий расширения функционала модуля управления, создания нового модуля для изменения параметров модели по текущим результатам эксперимента, т.е. фактически автоматизировать настройку модели для достижения заданных показателей системы. В случае моделей в сетях Петри QPNet доступ к данным модели и их корректировка не представляет проблем, т.к. формат кода модели есть XML несложной структуры.

Пример модели для реальной системы – Касперский ОС

В статье «Архитектура и надежность операционных систем» [5], где представлена математическая модель состояний микроядерной операционной системы, авторы утверждают «Натурный эксперимент для определения надёжности функционирования операционных систем различных архитектур практически невозможен в силу неприемлемых временных и финансовых затрат. Имитационное моделирование ситуацию не облегчает. Поэтому единственный путь решения этой проблемы – разработка простых и достаточно адекватных моделей». С последним утверждением нельзя не согласиться, но то, что имитационное моделирование неприменимо для оценки надежности?

Вопрос о применимости этого метода зависит от скорости эмуляции и от возможности проведения массовых экспериментов.

Пример модели (цепь Маркова) на рисунке 6 в форме графа состояний Касперский ОС (КОС) приводится в другой статье С.В. Назарова и А.Г. Барсукова [6]. Принимаются априорные оценки вероятностей переходов $\lambda_1 \div \lambda_{15}$ и решается система уравнений для нахождения значений вероятностей $P_1 \div P_7$ состояний КОС. Модель действительно простая, но в ней отсутствуют главные элементы вычислительной системы – пользовательские процессы. Эта модель была преобразована в имитационную модель на сетях Петри как систему массового обслуживания очередей пользовательский процессов трех типов с учетом возможных сбоев и ошибок (рисунок 6).

Представленная на рисунке 7 модель обрабатывает три заявки на обслуживание прикладных процессов ПП1 (2 потока, интервал 7 секунд, сигма =4с, счет =6с, запрос к Микроядру и Драйверу1), ПП2 (2 потока, интервал 16 секунд, сигма =6с, счет =10с, запрос к Микроядру и Драйверам1,2) и ПП3 (резидентный диалоговый процесс с короткими интервалами счета и возможностями задержек отклика, суммарно цикл составляет 2.1 секунду). При обслуживании процессов возможны сбои работы драйверов (интервал 10000с по экспоненциальному закону), которые ликвидирует Сервер восстановления КОС. Входные очереди процессов контролируются: если очередь ПП1 больше 10, один процесс отправляется в менее загруженный конвейер ПП2; 7-й процесс из очереди ПП2 отправляется в «Отказ в обслуживании», как случай переполнения очереди (процент отказов в обслуживании может рассматриваться как один из целевых показателей эффективности КОС).

Начальные значения ресурсов системы: Ядра ЦП = 14, потоки Микроядра = 8, Драйвер1,2 по 2, Сервер восстановления =2. Временные параметры задержек обработки событий в Касперский ОС взяты из модели Назарова. На рисунке 7 помещен скриншот за

вершения 3-го испытания (207 лет КОС), в табл. 3 показан итог пяти параллельных испытаний модели на том же моноблоке ICL за время 4 часа 20 минут. Реальное время КОС составило от

187 до 222 лет. Можно этот эксперимент интерпретировать как период работы КОС от 68 до 81 дня с частотой заявок в 1000 раз выше (т.е. ПП1 через 7мс, ПП2 через 16мс, цикл ПП3 2.1мс).

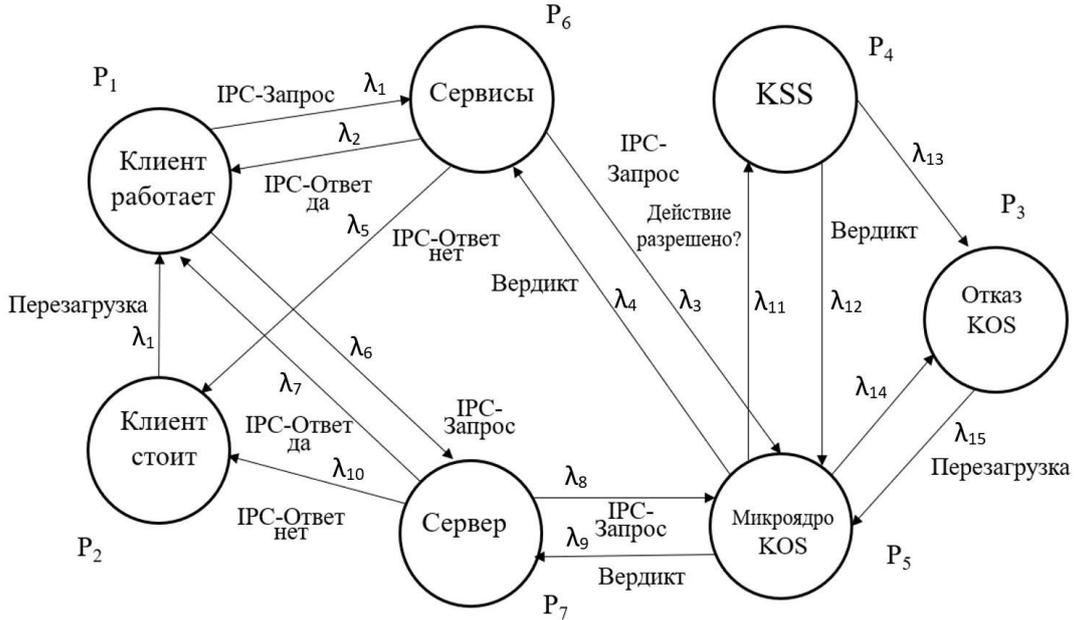


Рисунок 6. Граф состояний и переходов Касперский ОС

Figure 6. The graph of states and transitions of the Kaspersky operating system

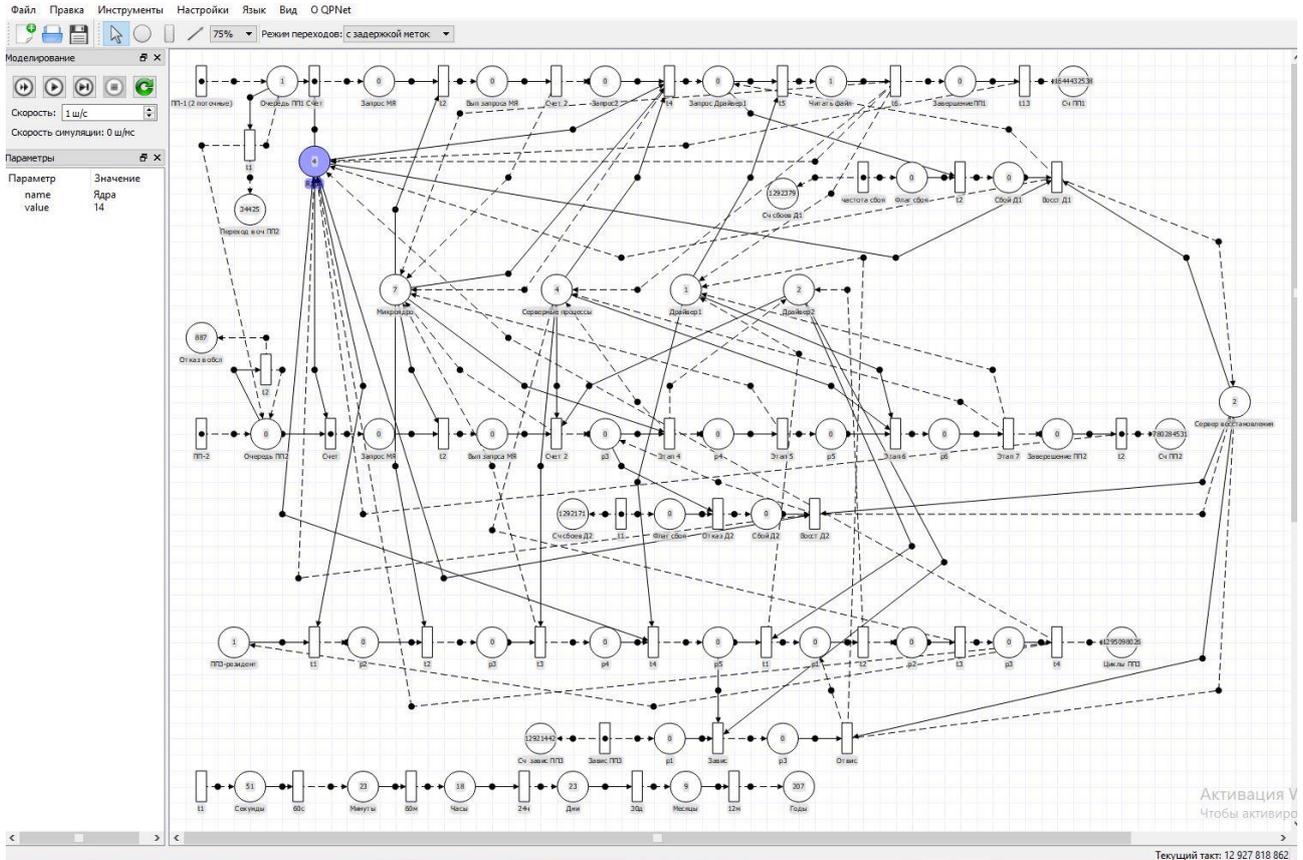


Рисунок 7. Результат испытания модели Касперский ОС на сетях Петри за 207 лет

Figure 7. The result of testing of the Kaspersky operating system model on Petri nets for 207 years

Таблица 3. Результат пяти испытаний модели Касперский ОС
 Table 3. The result of five tests of the Kaspersky operating system model

| № | Лет / Years | ПП1 (тыс.) / AP1 (thousand) | ПП2 (тыс.) / AP2 (thousand) | Циклы ПП3 (тыс.) / Cycles AP1 (thousand) | Переходы ПП1 в ПП2 / Transitions AP1 to AP2 | Сбои Драйвера1 / Driver failures 1 | Сбои Драйвера2 / Driver failures 2 | Зависания ПП3 / Freezes AP3 | Отказов в обслуж. / Service failures | Доля (%) отказов / Percentage (%) of failures |
|---|-------------|-----------------------------|-----------------------------|--|---|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 187 | 1484761,417 | 704515,045 | 1169285,759 | 31866 | 1165498 | 1165801 | 11665801 | 850 | 0,0000253 |
| 2 | 189 | 1503012,923 | 713182,830 | 1183726,173 | 31927 | 1183104 | 1180172 | 11810869 | 811 | 0,0000238 |
| 3 | 207 | 1644432,538 | 780284,531 | 1295098,026 | 34425 | 1292379 | 1292171 | 12921442 | 887 | 0,0000238 |
| 4 | 219 | 1736423,568 | 823925,74 | 1367624,895 | 37086 | 1365303 | 1362269 | 13638044 | 954 | 0,0000243 |
| 5 | 222 | 1759550,206 | 834897,923 | 1385651,888 | 36972 | 1382994 | 138097 | 13827661 | 935 | 0,0000235 |

*AP - application processes

Одно испытание привело к зависанию КОС из-за циклической взаимной блокировки (ресурсы ядер процессора, потоков микроядра и Драйвер2 обнулились) на конвейерах в промежутке между 180 и 242 годами работы (рисунок 8). Этот пример показывает необходимость более масштабных испытаний, которые

возможны в распределенных средах моделирования. По количеству переходов из очереди ПП1 в конвейер ПП2 можно оценить время, прошедшее с образования тупика, около 29 лет. Таким образом тупик возник примерно на 212 году работы модели КОС.

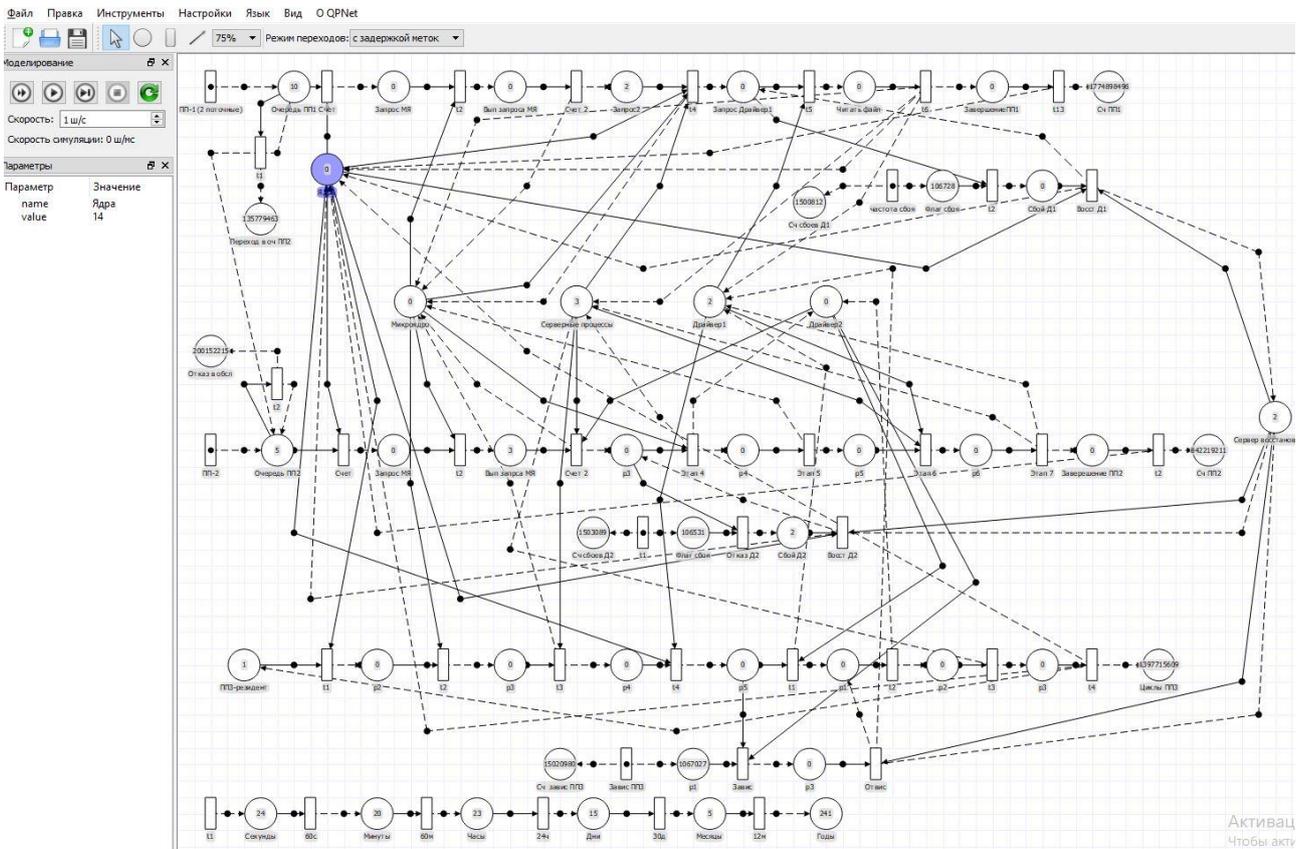


Рисунок 8. Тупик в распределении ресурсов КОС на 212-м году работы

Figure 8. Deadlock in the allocation of resources of the Kaspersky operating system in the 212th year of operation

Можно сделать вывод о том, что длительность испытаний, приведенная в табл.3, недостаточна для оценки такого фундаментального свойства операционных систем, как свобода от тупиковых ситуаций в обслуживании процессов. Среднее время работы КОС без тупиков можно рассматривать как второй целевой показатель эффективности КОС. Для его определения необходимо увеличить время моделирования минимум в два раза. Также увеличить число испытаний с 5 до необходимого количества, когда ситуация с тупиком повторится 10 раз и более. Распределенная среда моделирования здесь необходима.

Если постое удлинение циклов испытаний невозможно, как для QPNet, где счетчики событий имеют целый 32-битный тип и переполняются при достижении значения $2^{31}-1$ или около 2.15 млрд., есть вариант многократного увеличения числа испытаний, чтобы вариант с тупиком в КОС повторился много раз. Тогда можно определить вероятность работы КОС без тупиков за определенное время. Незначительное усложнение модели (введение двухкаскадных счетчиков событий с подсчетом миллиардов в дополнительном месте сети Петри) также может решить данную проблему.

Третий вариант – увеличение стартовых значений критически важных ресурсов КОС, например, числа процессорных ядер с 14 до 16, и/или потоков микроядра с 8 до 10, экземпляров Драйвера1 с 2 до 3. И повторное проведение испытаний. Распределенная среда моделирования позволит многократно сократить время таких испытаний.

Изменяя параметры входных очередей, значения ресурсов, длительность этапов обработки, можно быстро получить необходимые показатели эффективности, процент потерь, загрузка ресурсов, распределение очередей на конвейерах, и другие. Таким образом, имитационная модель дает большие возможности при проектировании, оптимизации и модернизации таких сложных систем, как отказоустойчивые операционные системы.

Описанные инструменты моделирования востребованы в учебном процессе подготовки специалистов по инженерным направлениям и по прикладной математике, о чем говорит положительный опыт авторов [7].

Выводы

1. Распределенные среды являются актуальными инструментами моделирования отказоустойчивых дискретных систем.
2. Для создания корпоративной среды распределенного моделирования достаточно типовых персональных компьютеров и локальной сети. Также необходим навык использования стандартов и библиотек MPI и языков программирования типа Go и Python.
3. Сверхбыстродействующие программы моделирования дают возможность проверить проектные решения для отказоустойчивых и долгоживущих систем в критических ситуациях на стандартном десктопе. Подключение подобных программ к распределенной среде позволяет многократно ускорить статистические испытания и повысить их точность.

Литература

1. SETI@Home – краудсорсинг-проект для обработки данных радиотелескопов. <https://habr.com/ru/companies/sberbank/articles/795185/> (дата обращения: 04.12.2024).
2. Проект добровольных вычислений на платформе BOINC. <https://www.worldcommunitygrid.org/> (дата обращения: 04.12.2024).
3. Морозова Е.А., Мачарадзе Г.Т., Чернов С.А. Анализ архитектур HLA, DIS и TENA для имитационного моделирования/ ВС/NW 2017 № 2 (31):10.1 <https://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=31&pa=10&ar=1> (дата обращения: 04.12.2024).
4. Курс моделирования систем на сетях Петри с использованием QPNet <https://online-edu.mirea.ru/course/view.php?id=8774> (дата обращения: 04.12.2024). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
5. С.В. Назаров, А.Г. Барсуков. Архитектура и надежность операционных систем. Современные информационные технологии и ИТ-образование. Том 14, № 1. 2018. DOI: 10.25559/SITITO.14.201801.038-051
6. С.В. Назаров, А.Г. Барсуков. Надёжность и безопасность операционных систем различной архитектуры. Часть 3. В журнале «Электроника: наука, технология, бизнес». <https://journals.eco-vector.com/1992-4178/article/view/632089> (дата обращения: 04.12.2024).
7. Бескин, А. Л. Инструменты компьютерного моделирования в учебном процессе технического университета / А. Л. Бескин, Н. В. Музылев // Continuum. Математика. Информатика. Образование. – 2023. – № 4(32). – С. 29-45. – DOI 10.24888/2500-1957-2023-4-29-45. – EDN RKLLHZ.

References

1. SETI@Home is a crowdsourcing project for processing radio telescope data. <https://habr.com/ru/companies/sberbank/articles/795185/> (accessed: 04.12.2024).
2. The project of voluntary computing on the BOINC platform. <https://www.worldcommunitygrid.org/> (date of reference: 04.12.2024).
3. Morozova E.A., Macharadze G.T., Chernov S.A. Analysis of HLA, DIS and TENA architectures for simulation modeling/ BC/NW 2017 No. 2 (31):10.1 <https://network-journal.mpei.ac.ru/cgi-bin/main.pl?l=ru&n=31&pa=10&ar=1> (accessed: 04.12.2024).
4. Course of modeling systems on Petri nets using QPNet \ <https://online-edu.mirea.ru/course/view.php?id=8774> (date of application: 04.12.2024). – Access mode: for authorization. users.
5. S.V. Nazarov, A.G. Barsukov. Architecture and reliability of operating systems. Modern information technologies and IT education. Volume 14, No. 1. 2018. DOI: 10.25559/SITITO.14.201801.038-051
6. S.V. Nazarov, A.G. Barsukov. Reliability and security of operating systems of various architectures. Part 3. In the journal "Electronics: science, technology, business". <https://journals.eco-vector.com/1992-4178/article/view/632089> (date of reference: 04.12.2024).
7. Beskin, A. L. Computer modeling tools in the educational process of the Technical University / A. L. Beskin, N. V. Muzylev // Continuum. Mathematics. Computer science. Education. – 2023. – № 4(32). – Pp. 29-45. – DOI 10.24888/2500-1957-2023-4-29-45. – EDN RKLHZZ.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|-------------------------------|--|
| Бескин Андрей Леонидович | кандидат технических наук, МИРЭА – Российский технологический университет, beskin@mirea.ru SPIN-код: 8977-9055 |
| Игонина Татьяна Романовна | кандидат физико-математических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, t-igonina@mail.ru SPIN-код: 8241-8087 |
| Кесельман Владимир Михайлович | кандидат физико-математических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, vmkes@yandex.ru SPIN-код: 2904-0211 |
| Параскевопуло Ольга Ригасовна | кандидат физико-математических наук, доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, paraskevopulo@mirea.ru |

Authors information

| Last name, first name, patronymic | Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors) |
|-----------------------------------|--|
| Beskin Andrey Leonidovich | PhD, MIREA - Russian Technological University, beskin@mirea.ru SPIN-code: 8977-9055 |
| Igonina Tatyana Romanovna | PhD, Associate professor, MIREA - Russian Technological University, t-igonina@mail.ru SPIN-code: 8241-8087 |
| Keselman Vladimir Mikhailovich | PhD, Associate professor, MIREA - Russian Technological University, vmkes@yandex.ru SPIN-code: 2904-0211 |
| Paraskevopulo Olga Rigasovna | PhD, Associate professor, MIREA - Russian Technological University, paraskevopulo@mirea.ru |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 23.11.2024 | одобрена после рецензирования 09.12.2024 | принята к публикации 20.12.2024 |
| the article was submitted 23.11.2024 | approved after reviewing 09.12.2024 | accepted for publication 20.12.2024 |

Научная статья

УДК 678.762.9

**ВЛИЯНИЕ НА РАСХОД ХЛОРИДА НАТРИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЕГО
ГОМОГЕНИЗАЦИИ В БУТАДИЕН-НИТРИЛЬНОМ ЛАТЕКСЕ**

| | | |
|----------------------------|---|--|
| Анна Витальевна Мякишева ✉ | 1 | annamakiseva01@gmail.com |
| Инна Николаевна Пугачева | 1 | eco-inna@ya.ru |
| Сергей Саввович Никулин | 1 | nikulin.nikuli@ya.ru |

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

Аннотация: В статье рассматривается влияние продолжительности контакта солевого агента – хлорида натрия, с латексом бутадиен-нитрильного каучука на снижение агрегативной устойчивости дисперсной системы. Увеличение времени гомогенизации латекса с 10 с до 3 мин приводит к снижению агрегативной устойчивости латексной дисперсии и уменьшению расхода NaCl с 250 до 200 кг/т каучука. Дальнейшее повышение времени контакта приводит к снижению выхода крошки каучука, что связано с восстановлением агрегативной устойчивости латексной дисперсии. Полученные данные в ходе исследования могут быть полезны для проектных и научно-исследовательских организаций, занимающихся производством эмульсионных каучуков.

Ключевые слова: латекс, хлорида натрия, коагуляция, продолжительность гомогенизации, крошка каучука.

Для цитирования: Мякишева А. В., Пугачева И. Н., Никулин С. С. Влияние на расход хлорида натрия продолжительности его гомогенизации в бутадиен-нитрильном латексе // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 66-70.

Original article

**DEPENDENCE OF THE AGGREGATE STABILITY OF LATEX BUTADIENE-NITRILE
RUBBER ON THE TIME OF CONTACT WITH THE COAGULATING AGENT**

| | | |
|----------------------|---|--|
| Anna V. Myakisheva ✉ | 1 | annamakiseva01@gmail.com |
| Inna N. Pugacheva | 1 | eco-inna@ya.ru |
| Sergey S. Nikulin | 1 | nikulin.nikuli@ya.ru |

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

Abstract: The article examines the effect of the duration of contact of the coagulating agent, sodium chloride, with latex of butadiene-nitrile rubber on the process of rubber separation. An increase in the homogenization time of latex from 10 seconds to 3 minutes leads to a decrease in the aggregate stability of the latex dispersion and a decrease in NaCl consumption from 250 to 200 kg/t rubber. A further increase in the contact time leads to a decrease in the yield of rubber crumbs, which is associated with the restoration of the aggregative stability of the latex dispersion. The data obtained in the course of the study can be useful for design and research organizations engaged in the production of emulsion rubbers.

Keywords: local anesthetics, extraction, chromatography in a thin layer, experiment planning.

For citation: Myakisheva A. V., Pugacheva I. N., Nikulin S. S. Dependence of the aggregate stability of latex butadiene-nitrile rubber on the time of contact with the coagulating agent. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 66-70. (In Russ.).

Введение

Производство синтетических каучуков во всем мире активно развивается. Синтетические каучуки находят широкое применение в композиционных составах различного назначения, в шинной и резинотехнической промышленности и др. [1].

Особое место в их производстве отводится каучукам, изготавливаемым по эмульсионной полимеризацией [2].

Данным способом получают бутадиен-стирольные (СКС), бутадиен- α -стирольные (СКМС), бутадиен-нитрильные (СКН) и др. Производству СКН, получаемых сополимеризацией бутадиена с аклилонитрилом, отводится повышенное внимание. Это связано с тем, что вулканизаты на основе СКН обладают повышенными прочностными показателями, твердостью,

износостойкостью, стойкостью к набуханию в алифатических растворителях, стойкостью к тепловому старению и др.

Производство эмульсионных каучуков, в том числе СКН, сопряжено с рядом экологических проблем. Наиболее проблематичной стадией в их производстве является стадия их выделения из латекса, проводимая с применением различных коагулянтов. В качестве коагулянтов применяются соли щелочей, щелочно-земельных металлов и других систем [2, 3]. Применение хлорида натрия для выделения СКН из латекса, как самого дешевого из коагулирующих реагентов, сопряжено с его большим расходом для выделения 1 т каучука из латекса (до 400 кг/т каучука). Это приводит к загрязнению сточных вод цехами выделения каучука из латекса, как хлоридом натрия, так и другими компонентами эмульсионной системы [3]. Это наносит непоправимый ущерб региональной экологии. Поэтому снижение расхода солевого коагулянта или его полное исключение из технологического процесса является важной и актуальной задачей. Данная цель может быть достигнута или путем решения ряда технологических аспектов, или путем замены хлорида натрия на другие коагулирующие агенты [3, 4]. В литературных источниках [5-8] были рассмотрены коагулирующие агенты, как на основе минеральных солей, так и на основе содержащих азот органических соединений, как низкомолекулярных, так и высокомолекулярных. В данной работе рассмотрен один из технологических приемов, позволяющих снизить расход хлорида натрия на выделение 1 т каучука из латекса СКН-40СНТ.

Целью работы было изучение влияния продолжительности контакта латекса бутадиен-нитрильного каучука с коагулирующим агентом - хлоридом натрия, на снижение агрегативной устойчивости системы.

Материал и методы исследования

В исследованиях использовался латекс каучука марки СКН-40СНТ имеющий сухой остаток ~17,4% мас. и pH=10. Выделение каучука из латекса СКН-40СНТ проводили согласно общепринятой методике [4] с использованием в качестве коагулирующего агента водного раствора хлорида натрия (ГОСТ 4233-77) с концентрацией 20% мас. и раствор серной кислоты (ГОСТ 2184-2013) в качестве подкисляющего агента, с концентрацией ~2,0% мас. Коагуляция латекса проводилась на установке, представляющей собой емкость с перемешивающим устройством. Скорость перемешивания составляла 70 об/мин. Процесс выделения протекал при температуре 20 ± 1 °С. После введения коагулирующего агента систему перемешивали в течение определенного времени: 0,16, 1, 3, 4, 5 минут. После чего вводили подкисляющий агент, перемешивали еще 2 - 3 минуты и отделяли от водной фазы (серума) образующуюся крошку каучука. Полноту коагуляции оценивали визуально по прозрачности серума и по массе выделившейся крошки каучука. Выделившуюся крошку промывали в воде и обезвоживали в сушильном агрегате при температуре 82 – 85 °С.

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс коагуляции латекса СКН-40СНТ хлоридом натрия протекает по концентрационному механизму. При гомогенизации латекса с хлоридом натрия в течение 10 с (0,16 мин.) агрегативная устойчивость не снижается, и расход хлорида натрия составляет 250 кг/т каучука. Результаты эксперимента по выделению бутадиен-нитрильного каучука из латекса хлоридом натрия представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние расхода коагулянта NaCl на выход крошки каучука
Table 1. The effect of NaCl coagulant consumption on the yield of rubber crumbs

| | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|------|------|
| Расход коагулянта NaCl, кг/т каучука / NaCl coagulant consumption, kg/t of rubber | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Расход подкисляющего агента H_2SO_4 , кг/т каучука / Consumption of acidifying agent, kg/t of rubber | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| Выход коагулюма, % / Coagulum output, % | 5,9 | 12,4 | 20,6 | 87,6 | 98,0 | 98,8 |
| Оценка полноты коагуляции / Assessment of the completeness of coagulation | кнп | кнп | кнп | кнп | кп | кп |

Примечание: pH водной фазы (серума) ~ 2,5; дозрев 2-3 мин, перемешивание 10 с; кнп – коагуляция неполная; кп – коагуляция полная.

Увеличение продолжительности контакта латекса с солевым электролитом до 1 мин приводит к понижению агрегативной устойчивости латексной дисперсии. Дальнейшее повышение контакта латекса с хлоридом натрия до 3 мин - приводит к максимальному снижению агрегативной устойчивости системы. Данное снижение может быть объяснено возникновением в системе повышенного количества укрупненных агрегатов на основе латексных глобул (флокуляция). Расход хлорида натрия при этом снижается до 200 кг/т каучука, необходимого для полного выделения каучука из латекса.

Однако дальнейшее повышение продолжительности гомогенизации до 5 минут

латексно-солевого композита приводит к возрастанию агрегативной устойчивости латексной дисперсии. Это может быть связано с разрушением латексных флокул на отдельные латексные глобулы. Система повышает свою устойчивость. Особенно это наглядно проявляется при проведении коагуляционного процесса с недостаточной дозировкой солевого компонента, необходимого для полного выделения каучука из латекса (расход 150 кг/т каучука).

Результаты эксперимента по изучению влияния продолжительности гомогенизации латекса бутадиен-нитрильного каучука хлоридом натрия на расход коагулянта и выход крошки каучука представлены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние продолжительности гомогенизации на расход NaCl и выход крошки каучука

Table 2. Effect of homogenization duration on NaCl consumption and rubber crumb yield

| | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Продолжительности перемешивания, мин. / Mixing time, min. | 0,16 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| Расход коагулянта NaCl, кг/т каучука / NaCl coagulant consumption, kg/t of rubber | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| Выход коагулюма, % / Coagulum output, % | 20,6 | 57,2 | 63,2 | 33,4 | 14,1 |
| Оценка полноты коагуляции / Assessment of the completeness of coagulation | кнп | кнп | кнп | кнп | кнп |
| Продолжительности перемешивания, мин. / Mixing time, min. | 0,16 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| Расход коагулянта NaCl, кг/т каучука / NaCl coagulant consumption, kg/t of rubber | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Выход коагулюма, % / Coagulum output, % | 85,1 | 90,8 | 96,9 | 89,7 | 88,9 |
| Оценка полноты коагуляции / Assessment of the completeness of coagulation | кнп | кп | кп | кп | кп |

Примечание: расход подкисляющего агента - H_2SO_4 , 13 кг/т каучука; pH водной фазы (серума) 2 - 2,5; дозрев 2-3 мин; кнп – коагуляция неполная; кп – коагуляция полная.

Измерение теплового эффекта процесса выделения каучука из латекса при введении хлорида натрия показало, что процесс протекает с понижением температуры, т.е. реакция является эндотермической.

Выводы

Установлено, что продолжительность перемешивания латекса бутадиен-нитрильного каучука с солевым компонентом оказывает влияние на агрегативную устойчивость дисперсной системы. Повышение гомогенизации латекса с коагулянтном до 3 минут позволяет снизить расход NaCl с 250 до 200 кг/т каучука. Это можно объяснить тем, что латексная дисперсия приобретает наименьшую стабильность за счет протекания флоку-

ляционного процесса, т.е. возникновением максимального количества флокул из латексных глобул снижает расход хлорида натрия на 50 кг/т каучука. Повышение продолжительности гомогенизации системы до 5 минут способствует протеканию обратного процесса – распада образовавшихся латексных флокул на глобулы. Возрастает стабилизация латексной системы и повышается расход хлорида натрия. За счет укрупнения флокул снижается устойчивость латексной дисперсии, приводящая к уменьшению расхода хлорида натрия. Процесс коагуляции латекса СКН-40СНТ хлоридом натрия протекает по концентрационному механизму с поглощением тепла (эндотермический процесс).

Литература

1. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. М.: КолосС. 2007. 367 с.
2. Аверко-Антонович Л.А., Аверко-Антонович Ю.О., Давлетбаева И.М., Кирпичников П.А. Химия и технология синтетического каучука. М.: Химия, КолосС. 2008. 357 с.
3. Никулин С.С., Вережников В.Н. Применение азотсодержащих соединений для выделения синтетических каучуков из латексов. Химическая промышленность сегодня. 2004. № 4. С. 26 – 37.
4. Пояркова Т.Н., Никулин С.С., Пугачева И.Н., Кудрина Г.В., Филимонова О.Н. Практикум по коллоидной химии латексов. М.: Издательский дом Академии Естествознания. 2011. 124 с.
5. Влияние хлорида натрия и температуры на эффективность выделения каучука из бутадиен-нитрильного латекса катионным полиэлектролитом / Вережников В.Н., Вострикова Г.Ю., Пояркова Т.Н. // Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76. № 8. С. 1359-1362.
6. Разработка экологически чистых способов выделения бутадиен-нитрильных каучуков из латексов / Папков В.Н., Гусев Ю.К., Блинов Е.В., Юрьев А.Н., Гадебский Г.А., Щелушкина Н.И., Чеботарева М.В., Решетникова Е.А. // Промышленное производство и использование эластомеров. 2010. № 3. С. 10-13.
7. Коагуляция промышленных эмульсионных каучуков в России полимерными четвертичными аммонийными солями. Хронология развития работы / Мисин В.М., Никулин С.С., Дюмаев К.М. Вестник // Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 1. С. 97-109.
8. Влияние способа выделения каучука из латекса на свойства эластомерных материалов на основе бутадиен-нитрильных каучуков / О.А. Дулина, А.Д. Тарасенко, А.М. Буканов, А.А. Ильин // Тонкие химические технологии. — 2017. — № 4. — С. 85-90. — ISSN 2410-6593. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/306128> — Режим доступа: для авториз. пользователей. — С. 1.

References

1. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. Chemistry and physics of polymers. Moscow: KolosS, 2007. 367 p.
2. Averko-Antonovich L.A., Averko-Antonovich Yu.O., Davletbaeva I.M., Kirpichnikov P.A. Chemistry and technology of synthetic rubber. Moscow: Khimiya, KolosS. 2008. 357 p.
3. Nikulin S.S., Verezhnikov V.N. The use of nitrogen-containing compounds for the isolation of synthetic rubbers from latexes. The chemical industry today. 2004. No. 4. pp. 26-37.
4. Poyarkova T.N., Nikulin S.S., Pugacheva I.N., Kudrina G.V., Filimonova O.N. Practicum on colloidal chemistry of latexes. Moscow: Publishing House of the Academy of Natural Sciences. 2011. 124 p.
5. Verezhnikov V.N., Vostrikova G.Yu., Poyarkova T.N. Influence of sodium chloride and temperature on the efficiency of rubber isolation from butadiene-nitrile latex by cationic polyelectrolyte // Journal of Applied Chemistry. 2003. Vol. 76. No. 8. pp. 1359-1362.
6. Development of environmentally friendly methods for isolating butadiene-nitrile rubbers from latexes / Papkov V.N., Gusev Yu.K., Blinov E.V., Yuryev A.N., Gadebsky G.A., Shchelushkina N.I., Chebotareva M.V., Reshetnikova E.A. // Industrial production and use of elastomers. 2010. No. 3. pp. 10-13.
7. Coagulation of industrial emulsion rubbers in Russia with polymer quaternary ammonium salts. Chronology of work development / Misin V.M., Nikulin S.S., Dumaev K.M. Bulletin // Kazan Technological University. 2013. Vol. 16. No. 1. pp. 97-109.
8. Influence of the method of rubber extraction from latex on the properties of elastomeric materials based on butadiene-nitrile rubbers / O.A. Dulina, A.D. Tarasenko, A.M. Bukanov, A.A. Ilyin // Fine chemical technologies. - 2017. — No. 4. — pp. 85-90. — ISSN 2410-6593. — Text : electronic // Lan : electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/306128> — Access mode: for authorization. users. — p. 1.

Сведения об авторах

| ФИО | <i>Сведения (учетная степень, звания, Email, ORCID(при наличии), и другие международные идентификационные номера)</i> |
|--------------------------------|--|
| Мякишева Анна Витальевна | студент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, кафедра Промышленной экологии и техносферной безопасности, annamakiseva01@gmail.com ORCID 0009-0007-0559-6615 |
| Пугачева Инна Николаевна | доктор технических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, заведующий кафедрой Промышленной экологии и техносферной безопасности, eco-inna@ya.ru ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000 РИНЦ Autor ID 256053 |
| Никулин Сергей Саввович | доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, nikulin.nikuli@ya.ru ORCID 0000-0002-8141-8008 Scopus Autor ID 7006115834 РИНЦ Autor ID 147185 |

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> |
|-----------------------------------|--|
| Myakisheva Anna Vitalievna | student, Voronezh State University of Engineering Technologies, department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, annamakiseva01@gmail.com ORCID 0009-0007-0559-6615 |
| Pugacheva Inna Nikolaevna | DSc, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, head of the Department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, eco-inna@ya.ru ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000 РИНЦ Autor ID 256053 |
| Nikulin Sergei Savvovich | DSc, professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, professor of the department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, nikulin.nikuli@ya.ru ORCID 0000-0002-8141-8008 Scopus Autor ID 7006115834 РИНЦ Autor ID 147185 |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 16.10.2024 | одобрена после рецензирования 01.11.2024 | принята к публикации 19.11.2024 |
| the article was submitted 16.10.2024 | approved after reviewing 01.11.2024 | accepted for publication 19.11.2024 |

ВЫДЕЛЕНИЕ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ ОТРАБОТАННОГО РАСТВОРА ТРАВЛЕНИЯ СТАЛИ МЕТОДОМ ДИАЛИЗА С АНИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ МА-41

Ольга Анатольевна Козадерова ✉¹ kozaderova-olga@mail.ru
Виктория Юрьевна Чернова¹ vikyart33@gmail.com

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

Аннотация. В настоящем исследовании предлагается вариант переработки отработанного раствора травления стали, содержащего соляную кислоту и хлорид железа (III), посредством диффузионного диализа с ионообменной мембраной МА-41. Показана возможность получения пермеата, обогащенного кислотой и ретентата, обогащенного солью. Найдены основные характеристики выделения соляной кислоты из раствора, содержащего HCl (1,5 моль дм⁻³) и хлорид железа (III) (0,25 моль дм⁻³). Диффузионный поток соляной кислоты на два порядка выше потока соли железа (III), что связано с более высокой подвижностью иона водорода как в растворе, так и в мембране, а также с более выраженным доннановским исключением из фазы мембраны многозарядных катионов. Предложена принципиальная схема процесса выделения соляной кислоты из отработанного травильного раствора, которая позволит возвратить регенерированную соляную кислоту на ранние стадии процесса травления.

Ключевые слова: выделение соляной кислоты, доннановский диализ, отходы травления стали, хлорид железа (III).

Для цитирования: Козадерова О. А., Чернова В. Ю. Выделение соляной кислоты из отработанного раствора травления стали методом диализа с анионообменной мембраной МА-41 // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 71-77.

Original article

ISOLATION OF HYDROCHLORIC ACID FROM SPENT STEEL ETCHING SOLUTION BY DIALYSIS WITH ANION EXCHANGE MEMBRANE MA-41

Olga A. Kozaderova ✉¹ kozaderova-olga@mail.ru
Victoria Yu. Chernova¹ vikyart33@gmail.com

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

Abstract. In this study, an approach is proposed for processing a spent steel etching solution containing hydrochloric acid and iron (III) chloride by means of diffusion dialysis with an ion exchange membrane MA-41. The possibility of obtaining permeate enriched with acid and retentate enriched with salt is shown. The main characteristics of hydrochloric acid isolation from a solution containing HCl (1.5 mol dm⁻³) and iron (III) chloride (0.25 mol dm⁻³) were found. The diffusion flux of hydrochloric acid is two orders of magnitude higher than the flux of iron (III) salt, which is due to the higher mobility of the hydrogen ion both in solution and in the membrane, as well as to the more pronounced Donnan exclusion from the membrane phase of multicharged cations. A schematic diagram of the hydrochloric acid extraction process from the spent pickling solution is proposed, which will allow the regenerated hydrochloric acid to be returned to the early stages of the etching process.

Keywords: hydrochloric acid isolation, Donnan dialysis, steel etching waste, iron (III) chloride.

For citation: Kozaderova O. A., Chernova V. Yu. Isolation of hydrochloric acid from spent steel etching solution by dialysis with anion exchange membrane MA-41. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 71-77. (In Russ.).

Введение

Травление стали проводится для удаления оксидов, шлаков, загрязнений и других нежелательных включений с поверхности изделия обработкой их в кислотах или щелочах. Такой процесс очистки необходим для улучшения адгезии при последующих технологических операциях - перед нанесением защитных покрытий, сваркой, склеиванием и т. д. Травление также влияет на внешний вид изде-

лия и общие механические свойства стали [1]. Для растворения продуктов коррозии применяются соляная кислота концентрации не менее 10% масс. и серная кислота 20-40% масс. Обычно скорость реакций в соляной кислоте значительно выше. Оптимальная температура для травления в соляной кислоте 30-40°C (при более высокой температуре возможен переход хлористого водорода в газовую фазу), в серной - 50-60°C. С целью уменьшения расхода кислоты и снижения потерь металла в травильные

растворы вводят ингибиторы коррозии, например, катапин и уротропин. Кроме соляной и серной кислот для травления металлов и сплавов используют также растворы ортофосфорной, азотной, плавиковой кислот. Например, для травления деталей из чугуна и кремнистых сталей, на поверхности которых есть включения формовочного песка, применяют раствор, содержащий 30 г/л HCl и 25 г/л HF; коррозионно-стойкие стали травят в смешанных растворах, например HCl:HNO₃:H₂O = 10:1:9 [2].

Одним из отходов линии травления стали являются отработанные травильные растворы, содержащие соляную кислоту и хлорид железа. Такие растворы предлагается перерабатывать с применением электролиза, экстракции, нейтрализации [3-6]. Однако эти технологии переработки редко применяют на производстве из-за сложности аппаратного оформления и дороговизны реагентов и оборудования. Альтернативным вариантом переработки растворов – отходов травления стали – может стать диффузионный диализ. Диффузионно-мембранные процессы обусловлены разностью концентраций веществ в растворах, находящихся по разные стороны мембраны, а также различным сродством компонентов раствора к материалу мембраны. При использовании анионообменной мембраны, содержащей положительно заряженные фиксированные функциональные группы, анионы кислоты свободно мигрируют через мембрану, в то время как перенос катионов ограничен исключением Доннана. Положительно заряженные ионы водорода, имеющие малую массу, небольшой размер, низкий положительный заряд, высокую подвижность испытывают Доннановское исключение в меньшей степени, чем другие катионы, например, Fe³⁺. В результате при диализной обработке смешанного раствора «соляная кислота/хлорид железа (III)» по одну сторону анионообменной мембраны можно получить кислоту (пермеат), а с другой стороны – раствор, обогащенный солью (ретентат). К преимуществам диализа следует отнести безреагентность, простоту оборудования, низкое энергопотребление, возможность реализации замкнутого цикла по соляной кислоте: регенерированную в ходе диализа соляную кислоту можно применять на ранних стадиях процесса травления – для подготовки травильного раствора заданной концентрации.

Цель работы - оценка возможности выделения кислоты из раствора «соляная кислота/хлорид железа (III)» методом диффузионно-го диализа с анионообменной мембраной МА-

41 и получение основных характеристик этого процесса.

Материалы и методы исследования

Для проведения диффузионного диализа применяли двухкамерную ячейку с анионообменной мембраной МА-41. Извлечение кислоты проводили в три стадии в режиме рецикла. Питающим раствором первой стадии был модельный отработанный травильный раствор, содержащий HCl 1,5 моль·дм⁻³ и FeCl₃ моль·дм⁻³. Ретентат первой стадии служил питающим раствором второй стадии, ретентат второй – питающим раствором третьей. В приемную камеру в каждой ступени выделения кислоты изначально подавали дистиллированную воду. В ходе процесса диализа принимающий раствор насыщался соляной кислотой. Соотношение объемов «питающий раствор : принимающий раствор» 1:1. Скорость подачи растворов 20 см³/мин. Рабочая площадь мембраны в ячейке 67 см². Схема установки представлена на рисунке 1.

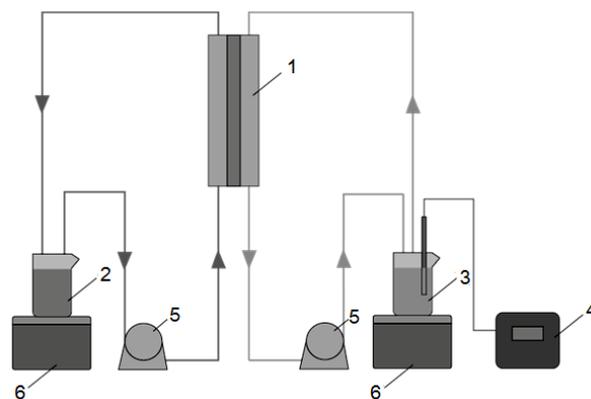


Рисунок 1. Схема лабораторной установки для периодического диализа:

1 – двухкамерная ячейка с анионообменной мембраной; 2 – емкость с питающим раствором; 3 – емкость с приемным раствором; 4 – pH-метр; 5 – перистальтический насос; 6 – магнитная мешалка

Figure 1. Diagram of a laboratory installation for periodic dialysis:

1 – two-chamber cell with an anion exchange membrane; 2 – container with a feeding solution; 3 – container with a receiving solution; 4 – pH meter; 5 – peristaltic pump; 6 – magnetic stirrer

Мембрана МА-41 гетерогенная анионообменная, состоящая из композиции высокоосновного анионообменника АВ-17 (65 %), с четвертичными аммониевыми группами в качестве фиксированных, полиэтилена (35 %) и армирующей ткани [7]. Некоторые характеристики мембраны МА-41 представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

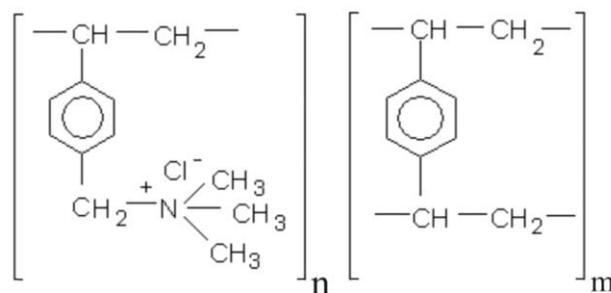


Рисунок 2. Составные повторяющиеся фрагменты анионообменной мембраны МА-41.

Figure 2. Repeating fragments of the anion exchange membrane MA-41.

Таблица 1. Основные технические характеристики применяемой анионообменной мембраны МА-41

Table 1. The main technical characteristics of the anion exchange membrane MA-41

| | |
|--|---------|
| Толщина, мм / Thickness, mm | 0,3-0,5 |
| Прочность при разрыве, Мпа / Tensile strength, MPa | 11,0 |
| Число переноса, доли, не менее / Transfer number, fraction, at least | 0,94 |
| Поверхностное электрическое сопротивление, Ом/см, не более / Surface electrical resistance, Ohm/cm, not more | 10,0 |
| Влагосодержание, % / Moisture content, % | 40±5 |

В течение эксперимента проводили измерения концентрации кислоты в пермеате при помощи рН-метра. По окончании эксперимента осуществляли титрование растворов пермеата и ретентата щелочью, а также определяли в этих растворах содержание железа (комплексометрическое титрование, Трилон Б в присутствии сульфосалициловой кислоты). По результатам анализа состава растворов находили значения плотности потоков компонентов через мембрану (J), коэффициента диализа (U , $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$), фактора разделения кислота/соль (S_F), степени извлечения кислоты (η), по формулам [8]:

$$J = \frac{1}{A} \cdot \frac{dn}{dt}, \quad (1)$$

$$U = \frac{n}{A \cdot t \cdot \Delta C}, \quad (2)$$

$$\Delta C = \frac{C_f^0 - (C_f^t - C_d^t)}{\ln \left[\frac{C_f^0}{C_f^t - C_d^t} \right]}, \quad (3)$$

$$S_F = \frac{U_H}{U_{Fe}}. \quad (4)$$

$$\eta = \frac{C_f^0(H^+) \cdot V_f^0 - C_f^t(H^+) \cdot V_f^t}{C_f^0(H^+) \cdot V_f^0} \quad (5)$$

Здесь M – количество вещества, прошедшее через мембрану, моль; A – площадь мембраны (м^2); t – время диализа (с); ΔC – средняя логарифмическая разность концентраций (моль· м^{-3}); C_f^0 и C_f^t – концентрации вещества в ретентате в начальный и конечный мо-

мент времени соответственно (моль· м^{-3}); C_d^t – концентрация вещества в пермеате в конечный момент времени (моль· м^{-3}). V_f^0 – объем отдающего раствора в начале эксперимента, дм^3 ; V_f^t – объем отдающего раствора по окончании эксперимента, дм^3 .

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3 представлены кинетические кривые изменения концентрации соляной кислоты в принимающем растворе для трех ступеней ее извлечения. Наблюдается заметное снижение скорости прироста концентрации кислоты в пермеате с каждым последующим экспериментом. Это связано с тем, что градиент концентрации соляной кислоты (движущая сила процесса) с каждым следующим этапом извлечения становится меньше, выход на плато концентрации кислоты наступает быстрее.

В таблице 2 приведены результаты расчетов средней плотности потока веществ через мембрану, коэффициента диализа по кислоте, фактора разделения. Состав растворов на каждой стадии извлечения кислоты представлен на рисунке 4. Плотность потока соли через мембрану с каждым последующим извлечением кислоты увеличивается, а плотность потока кислоты через мембрану снижается, это связано с использованием в качестве исходного раствора ретентата от предыдущего опыта, количество кислоты в котором значительно меньше. С каждым последующим извлечением кислоты из ретентата предыдущей стадии наблюдается значительное снижение фактора раз-

деления кислота/соль и степени извлечения кислоты, а содержание соли железа (III) в пермеате возрастает. При проведении серии последовательных экспериментов общая степень извлечения кислоты из исходного раствора составила 79,3 %, что в 1,6 раз больше, чем при

одностадийном извлечении с таким же соотношением объемов отдающего и принимающего растворов. Однако содержание Fe^{3+} в регенерированной кислоте при трехстадийной обработке модельного раствора намного выше.

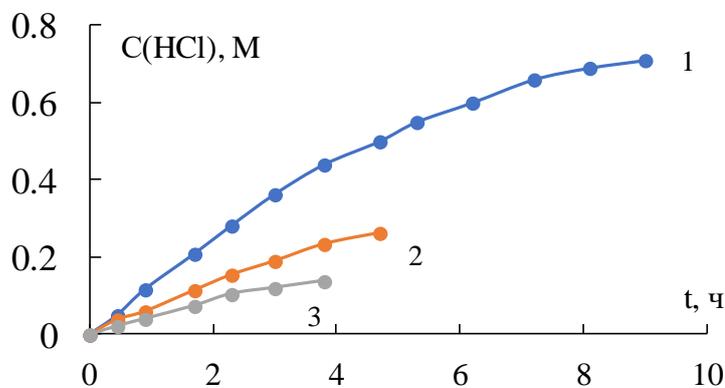


Рисунок 3. Изменение концентрации соляной кислоты в пермеате в течение эксперимента: первая ступень извлечения (кривая 1), вторая ступень извлечения (кривая 2), третья ступень извлечения (кривая 3).

Figure 3. Change in the concentration of hydrochloric acid in permeate during the experiment: the first stage of extraction (curve 1), the second stage of extraction (curve 2), the third stage of extraction (curve 3).

Таблица 2. Результаты расчетов средней плотности потока веществ через мембрану для трех последовательных ступеней извлечения кислоты

Table 2. The calculation results for the average flux density of the substances through the membrane for three successive stages of acid extraction

| Стадия извлечения / Extraction stage | $J(FeCl_3), 10^{-10}$ моль/(см ² ·с) mol/(cm ² ·s) | $J(HCl), 10^{-8}$ моль/(см ² ·с) mol/(cm ² ·s) | $U(H^+), 10^{-3}$ м ч ⁻¹ m h ⁻¹ | S_F | $\eta, \%$ |
|---|--|--|---|-------|------------|
| I | 2,5±0,2 | 3,9±0,3 | 1,8 | 46,6 | 47,3 |
| II | 7,2±0,7 | 2,8±0,2 | 2,4 | 36,2 | 21,3 |
| III | 6,5±0,5 | 1,8±0,1 | 2,2 | 23,4 | 10,7 |

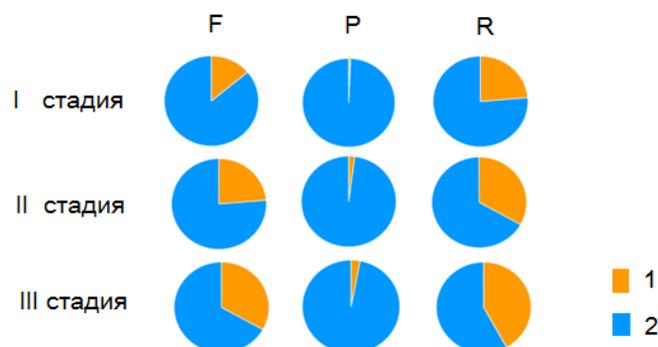


Рисунок 4. Мольное соотношение Fe^{3+} (1) / HCl (2) в питающем растворе (F), пермеате (P) и ретентате (R) на разных стадиях выделения соляной кислоты

Figure 4. The molar ratio of Fe^{3+} (1) / HCl (2) in the feed solution (F), permeate (P) and retentate (R) at different stages of hydrochloric acid release

По сравнению с другими анионообменными мембранами коэффициент диализа кислоты в изучаемых образцах МА-41 имеет невысокое значение, однако низкая проницаемость для соли железа (III) позволяет получить неплохой фактор разделения, сопоставимый с промышленно выпускаемыми мембранами в аналогичных системах [8]. Для улучшения характеристик разделения необходимо увеличивать перенос кислоты через мембрану и уменьшать перенос соли. Этого можно достичь применением как более тонких мембран МА-41 [9], так и модифицированных образцов [10]. В первом случае можно добиться увеличения коэффициента диализа, во втором – более высокой селективности мембраны. Например, поверхностное модифицирование анионообменной мембраны полипирролом позволяет сформировать слой, отталкивающий катионы. Это приводит к почти в два раза большему

фактору разделения кислота/соль, чем у исходной мембраны [9].

Практическую значимость проведенного исследования можно пояснить следующей схемой (рисунок 5). Отработанный травильный раствор из ванны травления ВТ поступает в накопительную емкость ЕН₁. Часть этого раствора направляется в рабочую емкость ЕР₁ и обрабатывается в диализной установке УД. Ретентат, полученный после диализа поступает в ЕН₂, это раствор, обогащенный хлоридом железа (III), который можно применять, например, для травления медных печатных плат [11]. Принимающий раствор, обогащенный соляной кислотой из рабочей емкости ЕР₂ после диализа перекачивается в накопительную ёмкость ЕН₄, откуда идет на приготовление травильного раствора. Травильный раствор соляной кислоты заданной концентрации подается в ванну травления стали. Таким образом, цикл по соляной кислоте замыкается.

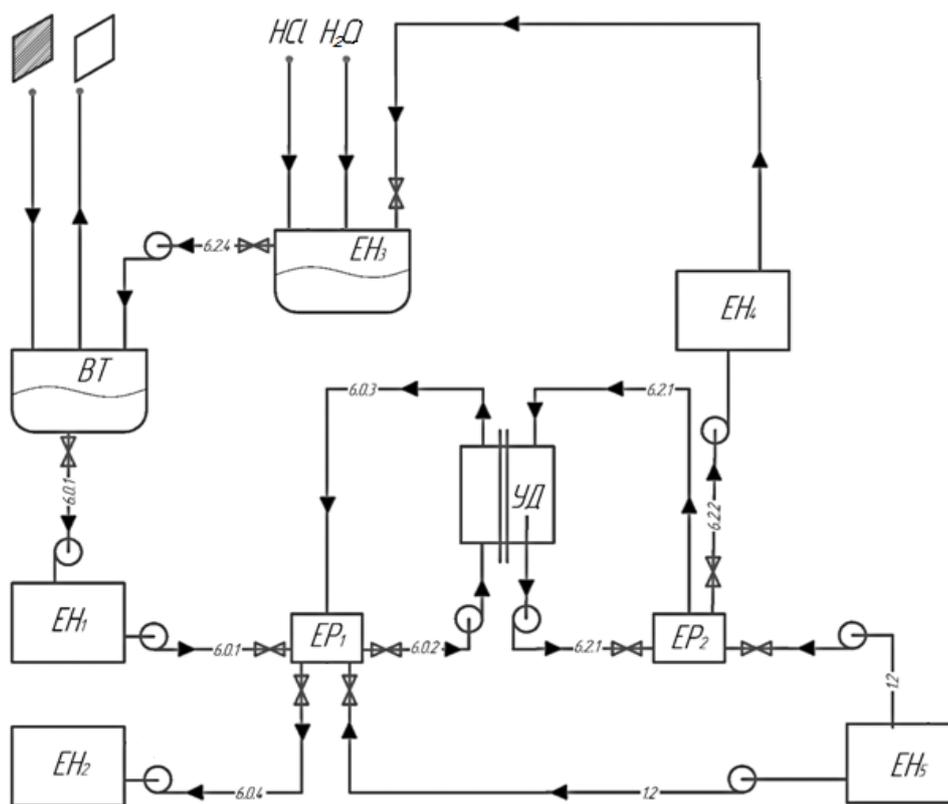


Рисунок 5. Принципиальная схема переработки отработанного травильного раствора: ЕН₃ – емкость накопительная для травильного раствора соляной кислоты, ЕН₄ – емкость накопительная пермеата после диализной обработки отработанного травильного раствора, ЕН₅ – емкость накопительная для воды, ЕР₂ – емкость рабочая принимающего раствора, остальные обозначения приведены в тексте

Figure 5. Schematic diagram of the processing of spent pickling solution: ЕН₃ is a storage tank for pickling hydrochloric acid solution, ЕН₄ is a storage tank of permeate after dialysis treatment of spent pickling solution, ЕН₅ is a storage tank for water, ЕР₂ is a working container of the receiving solution, the remaining designations are given in the text

Выводы

Определены основные характеристики диффузионного переноса соляной кислоты и соли железа (III) через анионообменную мембрану МА-41 из модельного травильного раствора - 1,5 моль·дм⁻³ HCl и моль·дм⁻³ FeCl₃: плотности потоков компонентов через мембрану; степень извлечения HCl; коэффициенты диализа; фактор разделения кислота/соль. Диффузионный поток соляной кислоты почти на два порядка выше, чем поток соли железа (III). Это связано с более высокой подвижностью иона водорода в изучаемой системе и бо-

лее сильным доннановским исключением многозарядных катионов из фазы анионообменной мембраны.

На основе проведенного лабораторного эксперимента по диализу предложена принципиальная схема регенерации компонентов отработанного травильного раствора. Полученный после регенерации раствор соляной кислоты может быть возвращен на стадию подготовки рабочего травильного раствора, что позволит организовать замкнутый технологический цикл по соляной кислоте.

Литература

1. Ившин Я. В. Электроосаждение металлов натиранием: учебно-методическое пособие [Текст] Казань: КНИТУ, 2022. 92 с.
2. Беккерт М. Способы металлургического травления. Москва: Металлургия, 1988. 400 с.
3. Комаров О.С. Проблемы переработки отходов электролизных и травильных производств // Литье и металлургия. 2011. № 1 (59). С. 49-51.
4. Быковский Н.А., Даминев Р.Р., Забиров Т.З., Пучкова Л.Н., Фанакова Н.Н. Переработка отработанных травильных растворов, содержащих фторид титана, плавиковую и соляную кислоты // Успехи современного естествознания. 2017. № 6. С. 7-12.
5. Пат. 2 232 208 Российская федерация, МПК C23F 1/46. Травильно-регенерационный процесс и способ регенерации отработанных травильных растворов [Текст] / В. И. Аксенов, ЗАО «Научно-производственное предприятие «Машпром». Опубл. 10.07.2004, 8 с.
6. Добровольский И.П., Селихов А.Б. Перспективные направления переработки солянокислых отработанных травильных растворов с получением бишофита, пигментов и коагулянтов // Вестник ЧелГУ. 2008. № 17. С. 28-31.
7. ООО «Инновационное предприятие «Щёкиноазот»: официальный сайт, Мембраны и характеристики, Тульская обл., - URL: <http://innov.n-azot.ru/product.php?pos=54=RU>
8. Zhang C. Diffusion Dialysis for Acid Recovery from Acidic Waste Solutions : Anion Exchange Membranes and Technology Integration // Membranes. 2020. Vol. 169. PP. 1-24. doi.org/10.3390/membranes10080169.
9. Гаршина Т.И., Козадёрова О.А., Шапошник В.А. Физико-химические характеристики тонких ионообменных мембран // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. № 1. С. 148-151.
10. Kim D.-H., Park H.-S., Seo S.-J., Park J.-S., Moon S.-H., Choi Y.-W., Kang M.-S. Facile surface modification of anion-exchange membranes for improvement of diffusion dialysis performance // Journal of Colloid and Interface Science. 2014. Vol. 416. PP. 19-24. doi:10.1016/j.jcis.2013.10.013.
11. Шашикантх, Р., Шихов, С. Мокрое травление печатных плат с использованием кислотного и щелочного методов // Технологии в электронной промышленности. 2023. № 1(137). С. 6-9.

References

1. Ivshin Y.V. Electrodeposition of metals by rubbing: educational and methodical manual. Kazan': KNIU, 2022. 92 p.
2. Bekkert M. Methods of metallurgical etching. Moscow, Metallurgiya, 1988, 400 p. (In Russ.)
3. Komarov O.S. Problems of electrolysis and etching productions waste processing // Foundry production and metallurgy. 2011. No 1 (59). pp. 49-51.
4. Bykovskiy N.A., Daminev R.R., Zabirov T.Z., Puchkova L.N., Fanakova N.N. Recycling of the waste etching solutions containing titanium fluoride, hydrofluoric and hydrochloric acids // Advances in current natural sciences. 2017. No 6. pp. 7-12.
5. Patent 2 232 208 Russian Federation, IPC C23F 1/46. Etching and regeneration process and method of regeneration of spent etching solutions / V.I. Aksenov, JSC "Scientific and Production Enterprise "Mashprom". Publ. 10.07.2004, 8 p.

6. Dobrovolskii I.P., Selikhov A.B. Promising areas of processing hydrochloric acid waste pickling solutions to produce bischofite, pigments and coagulants // Bulletin of Chelyabinsk State University. 2008. No 17. pp. 28-31.
7. Chemical Company Shchekinoazot. Available at: <https://n-azot.ru/product/heterogeneous-ion-exchange-membranes?lang=EN> (accessed 3 November 2024).
8. Zhang C. Diffusion Dialysis for Acid Recovery from Acidic Waste Solutions : Anion Exchange Membranes and Technology Integration // Membranes. 2020. V. 169. pp. 1-24. doi.org/10.3390/membranes10080169.
9. Garshina T.I., Kozaderova O.A., Shaposhnik V.A. Physico-chemical characteristics of thin ion-exchange membranes // Sorption and chromatographic processes. 2007. V. 7. No. 1. pp. 148-151.
10. Kim D.-H., Park H.-S., Seo S.-J., Park J.-S., Moon S.-H., Choi Y.-W., Kang M.-S. Facile surface modification of anion-exchange membranes for improvement of diffusion dialysis performance // Journal of Colloid and Interface Science. 2014. V. 416. pp. 19–24. doi:10.1016/j.jcis.2013.10.013.
11. Shashikanth R., Shikhov S. Wet etching of printed circuit boards using acid and alkaline methods // Technologies in the electronic industry. 2023. № 1(137). pp. 6-9.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, E-mail, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|------------------------------------|--|
| Козадерова Ольга Анатольевна | доктор химических наук, доцент, профессор кафедры неорганической химии и химической технологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», kozaderova-olga@mail.ru SPIN-код: 8995-5018 ORCID 0000-0002-8135-5801 Researcher ID AAG-5808-2020 Scopus Autor ID 6506406522 |
| Чернова Виктория Юрьевна | студент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», vikyart33@gmail.com ORCID 0009-0004-7781-1546 |

Authors information

| Last name, first name, patronymic | Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors) |
|-----------------------------------|--|
| Kozaderova Olga Anatol'evna | Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Professor of the Department of Inorganic Chemistry and Chemical Technology, kozaderova-olga@mail.ru SPIN-код: 8995-5018 ORCID 0000-0002-8135-5801 Researcher ID AAG-5808-2020 Scopus Autor ID 6506406522 |
| Chernova Viktoriya Yur'evna | student, Voronezh State University of Engineering Technologies, vikyart33@gmail.com ORCID 0009-0004-7781-1546 |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 04.11.2024 | одобрена после рецензирования 19.11.2024 | принята к публикации 03.12.2024 |
| the article was submitted 04.11.2024 | approved after reviewing 19.11.2024 | accepted for publication 03.12.2024 |

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БУТИЛКАУЧУКОВОГО МАСТИЧНОГО ПОКРЫТИЯ

Валерий Александрович Седых ¹ cdxva@mail.ru
Екатерина Михайловна Патенко ¹ patenko2001@mail.ru
Екатерина Валерьевна Королева ¹ katrakoroleva@gmail.com

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

Аннотация. Работа заключалась в усовершенствовании состава, технологии применения мастик низкотемпературного отверждения с повышенными деформационными свойствами. Исследовано влияние условий отверждения и состава мастик на эксплуатационные характеристики покрытий и герметизирующих швов. Отработаны рецептуры и технология получения покрытий на основе бутилкаучука БК-1675. Изготовлено грунтовое покрытие на основе бутилкаучука и крошки регенерированного каучука. Изучены прочностные, адгезионные и деформационные свойства получаемых каучуковых покрытий. Особенностью предлагаемых решений являлось использование в качестве эластичного наполнителя в матрице товарного БК-1675 крошки регенерата или вторичного бутадиенстирольного ТЭП. Наполнение герметика такой крошкой улучшило его деформируемость при сохранении упругопрочностных показателей. При получении каучуковых мастик низкотемпературного отверждения осуществлена замена гетерогенного окислителя оксид марганца на гомогенную – органическую гидроперекись.

Ключевые слова: бутилкаучук, регенерат, низкотемпературное отверждение, мастики, адгезия, деформация

Для цитирования: Седых В. А., Патенко Е. М., Королева Е. В. Усовершенствование технологии получения бутилкаучукового мастичного покрытия // Инженерные технологии. 2024. № 4 (8). С. 78-92.

Original article

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING BUTYL RUBBER MASTIC COATING

Valery A. Sedykh ¹ cdxva@mail.ru
Ekaterina M. Patenko ¹ patenko2001@mail.ru
Ekaterina V. Koroleva ¹ katrakoroleva@gmail.com

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

Abstract: the work consisted of improving the composition and application technology of low-temperature curing mastics with increased deformation properties. The effect of curing conditions and mastic composition on the performance characteristics of coatings and sealing joints was studied. The formulations and technology for producing coatings based on butyl rubber BK-1675 were developed. A primer coating based on butyl rubber and reclaimed rubber crumbs was manufactured. The strength, adhesion and deformation properties of the resulting rubber coatings were studied. A special feature of the proposed solutions was the use of reclaim crumbs or secondary butadiene-styrene TPE as an elastic filler in the matrix of commercial BK-1675. Filling the sealant with such crumbs improved its deformability while maintaining elastic strength properties. In the production of low-temperature curing rubber mastics, the heterogeneous oxidizer manganese oxide was replaced by a homogeneous one – organic hydroperoxide.

Keywords: butyl rubber, regenerate, low-temperature curing, mastics, adhesion, deformation.

For citation: Sedykh V. A., Patenko E. M., Koroleva E. V. Improvement of technology for producing butyl rubber mastic coating. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2024; (4 (8)): 78-92. (In Russ.).

Введение

В связи с развитием современной техники, эксплуатируемой в условиях воздействия давления или вакуума, высоких и низких температур, агрессивных сред, проблема уплотнения становится актуальной. В настоящее время в качестве уплотняющих материалов все чаще стали использовать герметики. Уплотнение неразъемных соединений на сегодня главным

образом производится с помощью каучуковых и олигомерных герметиков [1, 2].

Каучуковые мастики низкотемпературного отверждения являются важным материалом в судостроительной отрасли. Они широко используются для создания различных уплотнительных элементов на судах, таких как уплотнительные кольца, прокладки и другие детали. Эти материалы обладают высокой

устойчивостью к воздействию воды, масел и других агрессивных сред, что делает их идеальным выбором для использования в морских условиях.

Актуальность данной работы обусловлена:

- подорожанием импортных эластичных покрытий низкотемпературного отверждения;
- ограниченностью ассортимента растворных эластичных атмосферостойких покрытий низкотемпературного отверждения;
- недостаточной устойчивостью покрытий и герметиков к деформационным нагрузкам.

Цель работы – разработка составов и технологии применения покровных, герметизирующих мастик низкотемпературного отверждения.

Работа заключалась в отработке процедуры получения многослойных каучуковых пленочных покрытий и герметиков, в разработке методики испытания грунтового слоя покрытия на основе товарных каучуков и отходов вулканизатов, а также изучении технологических и технических показателей получаемых эластомерных покрытий, герметиков.

Герметики – это пастообразные, вязкотекучие массы, которые отверждаются в зазорах и соединениях конструкций с образованием эластичных прослоек или покрытий, предотвращающих утечки рабочих сред. Обладают свойствами близкими к свойствам резин и клеев [3, 4].

В зависимости от химизма происходящего после нанесения, герметики делятся на отверждающиеся (вулканизирующиеся) и неотверждаемые (невулканизирующиеся).

Отверждающиеся герметики являются реактопластами, которые под воздействием нагрева, влаги или химически отверждающих агентов – переходят в резиноподобное, эластичное состояние.

В последнее время широкое распространение нашли отверждающиеся герметики на основе силиконовых, уретановых и полисульфидных реакционноспособных олигомеров (PCO), а также каучуков малой неупругости.

Наиболее распространенными из атмосферостойких герметизирующих материалов являются (рисунок 1):

1) Силиконовые герметики – обладают устойчивостью к высоким температурам, ультрафиолетовому излучению и влаге, пригодны для использования в автомобильном и строительном секторах.

2) Полиуретановые герметики – устойчивы к атмосферным воздействиям, выдерживают большие нагрузки и применяются в конструктивных целях.

3) Полисульфидные герметики – используются в судостроении благодаря высокой степени уплотнения и устойчивости к морской воде.

4) Герметики на основе эластомеров малой неупругости.



Рисунок 1. Виды отверждаемых герметиков

Figure 1. Types of cured sealants

Отверждающиеся герметики обладают рядом преимуществ, таких как возможность создания надежной герметизации на поверхностях различной формы, а также способность долговременно служить в любых климатических зонах.

К недостаткам таких герметиков можно отнести:

- продолжительное время отверждения;
- точное соблюдение соотношения компонентов при их изготовлении, в противном случае они могут не полностью отвердеть или иметь пониженную прочность;
- ограниченная жизнеспособность после смешивания;
- низкая эластичность, что может привести к разрушению соединения при деформации или вибрации.

В работе рассматриваются герметизирующие мастики на основе каучуков низкой неупругости, в частности бутилкаучук (БК).

Каучуки низкой неупругости – это особый класс каучуковых эластомеров, которые дополнительно к стандартным свойствам каучуков обладают высокой эластичностью, обратимой деформацией и низкой вязкостью при высоких температурах. Отличительные особенности данных каучуков заключаются:

- высокая эластичность – позволяет восстанавливать свою форму и размер после деформации без потери своих характеристик;
- обратимая деформация – форма и размеры каучуков могут изменяться без повреждения структуры материала;
- низкая вязкость при высоких температурах;

- эластичность сохраняется при высоких температурах, что делает их устойчивыми к деформациям при высоких нагрузках.

Для вулканизатов из БК по сравнению с резинами на основе каучуков общего назначения характерны следующие особенности:

- повышенная теплостойкость от 120 до 200°C (температура эксплуатации зависит от выбора вулканизирующей группы – серной или смоляной) [5];

- эластичность при низкой температуре (вулканизаты из БК не кристаллизуются и не охрупчиваются при температуре до -60°C).

Бутилкаучук (БК) представляет собой продукт катионной сополимеризации изобутилена с небольшим (1-5%) количеством изопрена в растворе хлористого метила в присутствии катализатора Фриделя-Крафтса при температуре -100°C [6].

Основные физические и технические свойства бутилкаучуков представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства бутилкаучука

Table 1. Physical properties of butyl rubber

| Наименование показателей / Name of indicators | Значения / Values |
|--|-------------------|
| Плотность при 23°C, г/см ³ / Density at 23 °C, g/cm ³ | 0,92 |
| Молекулярная масса, у.е. / Molecular weight, cu. | 200000-650000 |
| Плотность энергии когезии, МДж/м ³ / Cohesion energy density, MJ/m ³ | 271 |
| Теплота горения, кДж/кг / Heat of gorenje, kJ/kg | 11200 |
| Температура, °C / Temperature, °C: | |
| стеклования / glass transition | минус 69 |
| вспышки / flash point | +187 |
| самовоспламенения / self-ignition | +402 |

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступал бутилкаучук БК 1675Н ТУ 2294-021-48158319-2001 (таблица 2).

Таблица 2. Свойства бутилкаучука и его вулканизатов

Table 2. Properties of butyl rubber and its vulcanizates

| Наименование показателей / Name of indicators | Значения / Values | Метод испытания / Test method |
|--|-------------------|-------------------------------|
| Вязкость по МуниUML 1+8 (125 °C), у.е. / Viscosity according to CUML, cu. | 45 – 56 | ГОСТ Р 54552 |
| Непредельность, % моль / Unsaturated content, % mol | 1,4 – 1,8 | ТУ 2294-021-48158319-2012 |
| Массовая доля / Mass fraction: летучих веществ, %, не более / volatile substances, no more антиоксиданта / the antioxidant (CAS № 6683-19-8), % зола, %, не более / ash content, %, max железа, %, не более / iron, %, max стеарата кальция, %, не более / calcium stearate, %, max | 0,3 | ГОСТ Р 54546 (метод С) |
| | 0,02 – 0,08 | ТУ 2294-021-4815931-2012 |
| | 0,3 | ГОСТ Р 54545 (часть А) |
| | 0,010 | ТУ 2294-021-48158319-2012 |
| | 1,2 | ТУ 2294-021-48158319-2012 |
| pH водной вытяжки / pH of the water extract | 6,5 – 7,5 | ТУ 2294-021-48158319-2012 |
| Оценка качества стандартного вулканизата по ГОСТ Р 54557 (Метод А) / Assessment of the quality of standard vulcanizate according to GOST R 54557 (Method A) | | |
| Условная прочность при растяжении, МПа, не менее / Conditional tensile strength, МПа, not less | 13 | ГОСТ Р 54533 |
| Относительное удлинение при разрыве, %, не менее / Elongation at break, %, not less | 450 | ГОСТ Р 54533 |
| Условное напряжение при 300% удлинении, МПа, не менее / Nominal voltage at 300% elongation, МПа, not less | 6 | ГОСТ Р 54533 |

| Вулканизационные характеристики (Реометр MDR 2000) / Vulcanization characteristics (MDR 2000 Rheometer) | | |
|---|------------------------|--------------|
| Крутящий момент (ML), дНм / Torque (ML), nm: минимальный / minimum | 2,7 – 3,7 | ГОСТ Р 54547 |
| | максимальный / maximum | 13,0 – 18,5 |
| Время / time: начала вулканизации (tsl), мин. / the beginning of vulcanization, min. | 1,7 – 3,4 | ГОСТ Р 54547 |
| достижения 50% степени вулканизации (tsl50), мин. / reaching 50% degree of vulcanization, min. | 5,0 – 8,0 | ГОСТ Р 54547 |
| достижения 90% степени вулканизации (tsl90), мин. / reaching 90% degree of vulcanization, min. | 16,5 – 22,5 | ГОСТ Р 54547 |

Бутилкаучук стоек к воздействию кислорода, солей металлов переменной валентности. При воздействии УФ-лучей, ионизирующих излучений и механических нагрузок он деформируется. Стоек к действию воды и кислот, реагирует с галогенами на свету с уменьшением молекулярной массы [6]. В процессе старения наблюдается отверждение БК – преимущественно по двойным связям.

Бутилкаучуки широко применяются в шинной и резинотехнической промышленности, например, для изготовления автомобильных камер и в качестве герметизирующего внутреннего слоя бескамерных шин [6], в строительной отрасли (кровельные и гидроизоляционные материалы, нетвердеющие герметики).

Низкотемпературная вулканизация бутилкаучуков. Наиболее пригодна для низкотемпературного отверждения бутилкаучука вулканизирующая система – *n*-хинондиоксид (ПХДО) в присутствии окислителей [7-11]. Дозировка ПХДО на 100 масс.ч. бутилкаучука выдерживается в пределах 1,5-6,0 масс.ч. Увеличение дозировки приводит к росту скорости отверждения, модуля при заданном удлинении, уменьшению относительного удлинения при разрыве, с сохранением прочности при растяжении вулканизата. Сам ПХДО не является вулканизирующим агентом. Для перевода ПХДО в действительный агент вулканизации его окисляют до – *n*-динитрозобензола.

Система вулканизации на основе ПХДО и диоксида марганца позволяет осуществлять отверждение каучуков в условиях атмосферы средней полосы РФ в летний период при температуре от 0 до 40° С [10]. Поэтому данные составы применяют и в качестве кровельных и гидроизоляционных материалов.

Доноры галогенов (дихлордиметилгидантоин и хлортолуолсульфенамид) в присутствии диоксидов свинца (PbO₂) или марганца (MnO₂), используются в качестве ускорителей отверждения каучуков при комнатной температуре.

Активность диоксидов свинца и марганца снижается с уменьшением окислительно-восстановительного потенциала. Эффективность оксидов повышается в присутствии таких полярных добавок, как вода, уксусная и неодекановая кислоты, спирты, которыми смачивают окислители. Для ускорения процесса отверждения в 1,5-2 раза достаточно 0,3-1,0 масс.ч. этих соединений.

Введение оксида магния в рецептуру частично замедляет отверждение системой ПХДО + окислитель. К ускорителям отверждения системы ПХДО + MnO₂, так же относятся бензоил-пероксид, дифенилпикрилгидразин, тетраметилдифенохинон, *n*-бензохинон. Вдвое ускоряют хиноидную вулканизацию бутилкаучука такие хлорсодержащие соединения, как хайпалон, хлорпарфины в количестве 10 масс.ч. При изготовлении светлоокрашенных изделий применяют окислительную систему – органический пероксид + органическая соль металла переменной валентности (например, нафтенат кобальта) [11].

ПХДО – слабо растворим в бутилкаучуке. Отсюда степень его дисперсности существенно влияет на его активность. Равномерное распределение в каучуке ПХДО достигается его нанесением из раствора на поверхность таких наполнителей как каолина. Зарубежные торговые марки (дибензо GMB-113, акселератор 117) содержат активного вещества (ПХДО) в пределах 33-35%, масс., а остальное инертный наполнитель.

Степень отверждения каучуков повышается, если в композицию входят вещества, растворяющие ПХДО или *n*-динитрозобензол. С этой целью используют диметилформамид, циклогексанон, толуол, ксилол, *o*-пирролидон. В зависимости от необходимой скорости отверждения дозировка этих добавок 1-10 масс.ч. на 100 масс.ч. каучука. В многокомпонентных композициях растворители вводят в ту часть, в которой находится ПХДО.

Соотношение ПХДО – окислитель оказывает влияние, как на скорость отверждения, так и на упруго-прочностные показатели получаемых вулканизатов. Установлено, что для системы дибензоатхининдиоксим + Pb_3O_4 эффективная плотность поперечных связей пропорционально возрастает содержанию окислителя почти до эквимольного соотношения окислитель – ПХДО. Повышение этого соотношения не приводит к увеличению концентрации поперечных связей, но снижает стойкость вулканизатов к старению.

Влияние на скорость отверждения и свойства вулканизатов оказывает и дисперсность окислителей, величина их удельной поверхности. Наименьшей активностью характеризуется диоксид свинца с совершенной кристаллической структурой. Дополнительное диспергирование образцов PbO , повышает их активность. Повышение размера частиц PbO с 0,3 до 0,7 мкм снижает её активность в 5 раз.

В свою очередь, диоксид марганца также лучше применять с высокой степенью дисперс-

ности. Введение их в композиции в виде предварительно приготовленных паст, например, дисперсий в полярном пластификаторе – вариант повышения активности оксидов металлов.

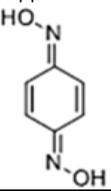
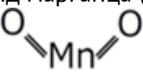
В качестве таких пластификаторов используют стеариновую кислоту, диалкилфталаты, парафин-нафтяные масла.

Для системы отверждения ПХДО – оксид металла переменной валентности или п-динитрозобензол характерно неоднородное распределение поперечных связей макромолекул по поверхности плохо растворимых частиц оксидов или п-динитрозобензола и возникновение дефектов в структуре вулканизатов. Отсюда предпочтительнее в качестве окислителя использовать соединения с меньшим окислительно-восстановительным потенциалом, но с большей растворимостью в каучуковой матрице.

В работе в качестве вулканизирующих агентов использовались ПХДО в комбинации с диоксидом марганца или органической гидроперекисью (таблица 3).

Таблица 3. Основные свойства компонентов вулканизирующей группы

Table 3. Main properties of the components of the vulcanizing group

| Номер ТУ / technical condition number | Основные характеристики / Main Features | Получение / Receiving | Применение / Application |
|---|---|--|---|
| Парахинондиоксим (ПХДО) | | | |
|  | | | |
| ТУ 6-02-954-84 | Порошок мелкокристаллический от светло-серого до темно-серого цвета, растворяется в ацетоне; содержание основного вещества не менее 70% | Получают реакцией хинона с гидросиламином | Применяется как термостабилизатор в производстве стирола, бутилкаучуковых мастик, кабельной изоляции, пористых изделий. Является активатором вулканизации клеев и вулканизирующим агентом для резиновых смесей на основе натурального и синтетических каучуков. |
| Диоксид марганца (MnO_2) | | | |
|  | | | |
| ТУ 6-09-01-775-90 | Тонкодисперсный нерастворимый в воде порошок/гранулы черного цвета, при содержании основного вещества не менее 80,2% | В лаборатории получают термическим разложением $KMnO_4$ или реакцией $KMnO_4$ с H_2O_2 . | Применяется как окислитель в гидрометаллургии; в резиновой промышленности как вулканизирующий агент. |

Наполнители. Бутилрегенерат (БР) – продукт переработки изношенных автомобильных камер, диафрагм и варочных камер,

представляет собой пластичный каучукоподобный материал. Бутилрегенерат получают в результате пластикации исходного сырья в

резиносмесителе с добавлением нефтяных пластификаторов и дальнейшей доработкой на рафинировочных вальцах [12-14] или после предварительного облущения.

БР имеет высокую эластичность и устойчивость к разрывам, что делает его идеальным материалом для производства автомобильных шин, уплотнительных материалов, прокладок, уплотнителей, резиновых кабельных оболочек и др.

Помимо этого, бутилрегенерат используют в производстве грунтовок для поверхностей, которые будут покрыты резиновыми материалами. Такая грунтовка обеспечивает хорошую адгезию резиновых материалов к поверхности, повышает их прочность и устойчивость к воздействию окружающей среды.

Одним из основных преимуществ БР является его экологическая безвредность для природы и низкая стоимость. Использование отработанных автомобильных камер и других резиновых изделий для производства новых материалов позволяет уменьшить количество отходов и снизить негативное воздействие на окружающую среду. В целом, бутилрегенерат является важным материалом для производства резиновых изделий и имеет множество преимуществ, включая высокую прочность, долговечность, экологическую природу.

Бентонит ГОСТ 28177-89 [15] – это природный минерал, который состоит из глины и имеет высокую поглощающую способность. Он широко используется в различных отраслях промышленности, включая нефтяную, горнодобывающую, строительную и другие.

Методы исследования

Определение твердости по Шору А осуществляли согласно ГОСТ 263-75 [16]. Измеряется глубина вдавливания в полимеринден-

тора под действием заданной силы. Твердость при вдавливании зависит от модуля упругости, вязкоэластических свойств материала и обратно пропорциональна глубине вдавливания.

Определение упруго-прочностных свойств при растяжении регламентируется ГОСТ 270-75 [17]. Суть метода заключается в растяжении образцов с постоянной скоростью до разрыва, с измерением силы, а также в момент разрыва – относительного удлинения образца на разрывной машине РМИ-250 при температуре 23 ± 2 °С при скорости движения нижнего зажима 250 мм/мин.

Прочность связи при расслаивании регламентируется ГОСТ 6768-75 [18]. Сущность данного метода заключается в расслаивании склеенного соединения.

Кратковременное статическое сжатие определяли согласно ГОСТ 6768-77 [19]. Суть метода заключается в нагружении образца, помещенного между двумя параллельными плоскостями и последующим измерением величин относительной и остаточной деформации.

Результаты и их обсуждение

1. Обработка порядка изготовления и отлива мастики, подготовки наполнителя, получения листовых субстратов на основе регенерата бутилкаучука (БР)

Мастичное двухслойное герметизирующее покрытие предусматривает грунтовый слой, наполненный крошкой эластичного наполнителя в матрице товарного БК и финишный слой так же на основе товарного БК, отвержденные системой ПХДО + окислитель.

Получение мастики осуществлялось следующим образом: сначала готовился раствор товарного БК. Каучуки измельчали и растворяли в нефрасе (рисунок 2).



Рисунок 2. Схема подготовки матрицы товарного БК и наполнителя мастики (крошки нБР или СБС)

Figure 2. Scheme of preparation of the matrix of commercial BC and filler mastic (nBR or SBS crumbs)

Исходный БР пропускали через зазор валцов 5-6 раз, после чего в резиносмесителе дробно вводили бентонит и стеариновую кислоту. Наполненный нБР подвергали листованию.

Далее, в соответствии с рецептурами, в расчетное количество раствора товарного БК добавлялись вулканизирующие агенты – ПХДО +

диоксид марганца или ПХДО + органическая гидроперекись (ГПО), а также крошка наполненного бутилрегенерата (нБР) или термоэластопласта СБС-30 и все тщательно перемешивалось (рисунок 3). Полученные мастики отливались в формы (рисунок 4).



Рисунок 3. Схема отлива и сушки грунтового и финишного слоев для определения прочности при растяжении

Figure 3. Scheme of refilling and drying of the ground and finishing layers to determine the tensile strength



Рисунок 4. Вид финишный (а) и грунтового (б) слоев на основе отвержденного товарного БК

Figure 4. Type of finishing (a) and ground (b) layers based on cured commercial grade

2. Определение упруго-прочностных показателей слоев мастичного покрытия товарного БК после отверждения

Работа заключалась в определении прочности при растяжении (G_p), относительного (E_p) и остаточного ($E_{ост}$) удлинения при разрыве отвержденных финишного и грунтового слоев мастики на основе товарного бутилкаучука (таблицы 4-7).

Изучалось влияние содержания агентов вулканизации на упруго-прочностные показатели финишного слоя товарного БК.

Двукратное снижение дозировки отверждающих компонентов ПХДО + MnO_2 привело к пятикратному уменьшению прочности при одновременном кратном увеличении относительного и остаточного удлинения при разрыве (таблица 4, пп.13, 15).

Таблица 4. Упруго-прочностные показатели финишного слоя товарного БК, отвержденного ПХДО + MnO_2 (10% и 5%)

Table 4. Elastic strength characteristics of the final layer of commercial BC cured with PCB + MnO_2 (10% and 5%)

| G_p , МПа | E_p , % | $E_{ост}$, % |
|--|-----------|---------------|
| 13) товарный БК + ПХДО (10% на БК) + MnO_2 (10% на БК) | | |
| 1,5 | 261-456 | 78-137 |
| 15) товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO_2 (5% на БК) | | |
| 0,2-0,3 | 1700-1800 | 240-280 |

Замена MnO_2 на органическую гидроперекись не привела к увеличению прочности при растяжении слоя отвержденного товарного

БК при существенном снижении относительного и остаточного удлинения при разрыве (таблица 5, пп. 16).

Таблица 5. Упруго-прочностные показатели финишного слоя товарного БК, отвержденного ПХДО + ГПО

Table 5. Elastic strength parameters of the finishing layer of commercial BC cured with PCDO + GPO

| G_p, МПа | E_p, % | E_{ост}, % |
|--|-------------------------|---------------------------|
| 16) товарный БК + ПХДО (10% на БК) + ГПО (20% на БК) | | |
| 0,15-0,37 | 400-740 | 20-60 |

Следующий этап работы заключался в оценке кажущихся упруго-прочностных показателей двухслойного покрытия: грунтового слоя в присутствии крошки наполненного бентонитом регенерата БК (нБР) в матрице отвержденного товарного БК; финишного слоя товарного БК так же отвержденного системой ПХДО + MnO₂

Получение покрытия включало двухстадийную процедуру отливки.

На первой стадии отливался грунтовый слой крошка нБР в растворе товарного БК в присутствии отвердителей (компоненты А + Б). После улетучивания растворителя грунто-

вый слой усаживался, образовывались трещины с нарушением сплошности покрытия (рисунок 5 а).

На второй стадии в результате повторной заливки поверх грунтового слоя финишного слоя раствора товарного БК в присутствии отвердителей целостность покрытия улучшалась (рисунок 5 б).

Кажущаяся прочность такого покрытия при растяжении при содержании отверждающих компонентов по 5% масс на товарный БК составляло 0,05-0,06 МПа при относительном и остаточном удлинении при разрыве 100 – 180% и 4 – 12%, соответственно (таблица 6, пп. 19).

Таблица 6. Упруго-прочностные показатели двухслойного покрытия в присутствии крошки БР, отвержденного ПХДО + MnO₂

Table 6. Elastic strength characteristics of a two-layer coating in the presence of BR crumbs, cured with PCB + MnO₂

| G_p, МПа | E_p, % | E_{ост}, % |
|--|-------------------------|---------------------------|
| 19) Компонент А: товарный БК + нБР в бензине + ПХДО (5% на БК); Компонент Б: товарный БК + нБР в бензине + MnO ₂ (5% на БК) – грунтовый слой; Товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO ₂ (5% на БК) – финишный слой | | |
| 0,05-0,06 | 100-180 | 4-12 |
| 15) товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO ₂ (5% на БК) – финишный слой | | |
| 0,2-0,3 | 1700-1800 | 240-280 |



Рисунок 5. Вид двухслойного отвержденного покрытия:
а – грунтовый слой на основе товарного БК, наполненного крошкой нБР;
б – финишный слой на основе товарного БК

Figure 5 – View of a two-layer cured coating:
а – a primer layer based on commercial BC filled with nBR crumbs;
б – a finishing layer based on commercial BC

По сравнению с упруго-прочностными показателями финишного слоя (таблица 6 пп. 15) кажущаяся прочность двухслойного покрытия уменьшилась в 4 раза, а относительное и остаточное удлинение при разрыве снизились на порядок вследствие присутствия крошки эластичного наполнителя (таблица 6, пп. 19).

Представляет интерес замена крошки нБР на крошку некондиционного бутадиенстирольного термоэластопласта СБС-30.

В отличие от предыдущего порядка формирования двухслойного покрытия смачивание

сухой крошки ТЭП (не более 2 мм) осуществлялось без предварительного набухания в растворе товарного БК в присутствии агентов отверждения.

В случае двухстадийного формирования покрытия в присутствии ПХДО + двуокись марганца при их содержании 10 и 5% масс. Достигнута кажущаяся прочность 0,09 - 0,10 МПа при относительном и остаточном удлинении 400 - 740% и 12%, соответственно (таблица 7, пп. 18).

Таблица 7. Упруго-прочностные показатели двухслойного покрытия в присутствии крошки СБС, отвержденного ПХДО + MnO₂ или ГПО

Table 7. Elastic strength characteristics of a two-layer coating in the presence of SBS crumbs, cured PCB + MnO₂ or GPO

| G _p , МПа | E _p , % | E _{ост} , % |
|--|--------------------|----------------------|
| 18) товарный БК + СБС-30 (крошка н/б 2 мм) + ПХДО (10% на БК) + MnO ₂ (10% на БК) – грунтовый слой; товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO ₂ (5% на БК) – финишный слой | | |
| 0,09-0,10 | 400-740 | 12 |
| 17) товарный БК + СБС-30 (крошка н/б 2 мм) + ПХДО (10% на БК) + MnO ₂ (10% на БК) – грунтовый слой; товарный БК + ПХДО (10% на БК) + ГПО (20% на БК) на БК – финишный слой | | |
| 0,08 | 60-110 | 4 |

Замена двуокиси марганца на ГПО при повторной заливке грунтового слоя с крошкой СБС-30 финишным слоем привела к снижению кажущейся прочности до 0,08 МПа при относительном и остаточном удлинении при разрыве 60 – 110% и 4%, соответственно.

3. Оценка совулканизирующей способности бутилкаучуковых мастичных покрытий

Оценка степени совулканизации поверхности крошки нБР (или крошки СБС-30) к то-

варному БК моделировалась совмещением промазанных мастикой листов этих материалов с последующим определением прочности связи при расслаивании соединения.

Полученные мастичные составы были использованы для низкотемпературной совулканизации как листов нБР как с резиной на основе каучуков общего назначения, так и для склеивания двух листов нБР (рисунок 6).



Рисунок 6. Схема получения совулканизированного соединения «регенерат-резина» и «регенерат-регенерат» промазкой мастичным составом

Figure 6. Scheme of preparation of the combined compound "regenerate-rubber" and "regenerate-regenerate" with a smear mastic compound

На листы нБР и резины наносили толстым слоем мастику, подвергали открытой выдержке не менее 5 мин, соединяли между собой и прижимали друг к другу под нагрузкой. Высохшие соединения листов расслаивали на разрывной машине.

Прежде всего, исследовалось влияние порядка ввода компонентов в раствор товарно-

го БК на прочность связи при расслаивании «регенерат-резина».

Смешивался компонент А (раствор товарного БК, набухшая в нефрасе крошка нБР в присутствии ПХДО, порошка бентонита) с компонентом Б (набухшая крошка нБР, бентонит в присутствии двуокиси марганца) (таблица 8).

Таблица 8. Кажущаяся прочность при расслаивании ($G_{рас}$) системы «регенерат-резина», соединенных грунтовым слоем мастики

Table 8. Apparent strength at delamination ($G_{ра}$) regenerate-rubber systems connected by a primer layer of mastic

| $G_{рас}$, кН/м | Тип разрушения / Type of destruction |
|---|---|
| 1) Компонент А: товарный БК + бентонит (порошок) + «ПХДО (10% на БК) регенерат + нБР» Компонент Б: «MnO ₂ (10% на нБР) + бентонит (порошок) + нБР» | |
| 0,41 | Адгезионное – следы мастики остались на поверхности нБР |

Низкий показатель прочности связи «резина-регенерат» объяснялся несовершенством порядка промазки листовых субстратов.

Отклонение от порядка отлива мастичного состава в части уменьшения времени открытой выдержки и завышения нагрузки на соединение поверхностей «резины-регенерат» привело к проявлению эффекта «голодный шов».

Соблюдение порядка отлива мастичного состава позволило установить фактические

показатели прочности связи при расслаивании «резина-регенерат» (таблица 9, пп. 2).

Представляет интерес установление влияния содержания вулканизирующих агентов на прочность связи при расслаивании «резина-регенерат». Снижение содержания вулканизирующих агентов в 2 раза (с 10 до 5% на каучук) привело к снижению в 1,5-2,0 раза показателя адгезии (таблица 9, пп. 2, 5).

Таблица 9. Прочность при расслаивании системы «регенерат-резина» соединенной финишным слоем мастики, отвержденного ПХДО + MnO₂ (5% и 10%)

Table 9. Delamination strength of the regenerate-rubber system connected by a finishing layer of mastic cured with PCB + MnO₂ (5% and 10%)

| $G_{рас}$, кН/м | Тип разрушения / Type of destruction |
|--|---|
| 2) товарный БК + ПХДО (10% на БК) + MnO ₂ (10% на БК) | |
| 1,2-1,3 | Адгезионный – следы мастики остались на поверхности нБР |
| 5) товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO ₂ (5% на БК) | |
| 0,63-0,80 | Адгезионный – следы мастики осталась на поверхности нБР |

Далее исследовалось влияние замены гетерогенного окислителя в вулканизирующей группе (порошка двуокиси марганца) на жидкий окислитель – органическую гидроперекись (ГПО).

ГПО полностью растворяется в растворителе (гомогенное распределение), является непылящим компонентом.

Поскольку содержание активного вещества в ГПО составляло 46-50%, ее дозировку увеличивали в два раза.

Установлено двукратное снижение прочности связи «резина-регенерат» товарным БК в присутствии ПХДО + ГПО по сравнению с системой ПХДО + MnO₂ (табл. 10, пп. 2, 4).

Таблица 10. Прочность при расслаивании соединения «регенерат-резина» при использовании финишной мастики, отвержденной ПХДО + ГПО (20%) и ПХДО + MnO₂ (10%)

Table 10. Delamination strength of the regenerate-rubber compound when using finishing mastic cured with PCB + GPO (20%) and PCB + MnO₂ (10%)

| $G_{рас}$, кН/м | Тип разрушения / Type of destruction |
|--|---|
| 2) товарный БК + ПХДО (10% на БК) + MnO ₂ (10% на БК) | |
| 1,2-1,3 | Адгезионный – следы мастики остались на поверхности нБР |
| 4) товарный БК + ПХДО (10% на БК) + ГПО (20% на БК) | |
| 0,6-0,7 | Адгезионный – следы мастики остались на поверхности нБР |

В процессе расслаивания «регенерат-резина» следы финишного покрытия на основе товарного отвержденного БК оставались толь-

ко на поверхности листового регенерата при полном отсутствии на поверхности листовой резины (рисунок 7 а).



Рисунок 7. Влияние природы субстрата на тип расслаивания совулканизированных соединений а) «регенерат - резина», б) «регенерат - регенерат»

Figure 7. Influence of the nature of the substrate on the type of delamination of vulcanized compounds а) "regenerate - rubber", б) "regenerate - regenerate"

Поскольку в процессе расслаивания слоев «резина-регенерат» следы отвержденной мастики оставались только на поверхности регенерата БК (рисунок 7 б), то в дальнейшем в качестве испытываемых листовых субстратов использовался наполненный регенерат БК (нБР) (рисунок 8).

Склеивание с последующей совулканизацией листовых субстратов регенерата мастичным составом для финишного слоя в присутствии ПХДО + ГПО позволило увеличить прочность связи при расслаивании в полтора раза (таблица 11, пп. 4, 6).

Таблица 11. Прочность при расслаивании системы «регенерат-резина» и «регенерат-регенерат» соединенных финишным слоем мастики, отвержденных ПХДО + ГПО

Table 11. Delamination strength of the regenerate-rubber and regenerate-regenerate systems connected by a finishing layer of mastic cured with PCDO + GPO

| $G_{рас}$, кН/м | Тип разрушения / Type of destruction |
|--|--|
| 4) Регенерат-резина: товарный БК + ПХДО (10% на БК) + ГПО (20% на БК) | |
| 0,6-0,7 | Адгезионный – следы мастики остались на поверхности нБР |
| 6) Регенерат-регенерат: товарный БК + ПХДО (10% на БК) + ГПО (20% на БК) | |
| 0,9-1,0 | Когезионный – следы мастики распределились по обоим листам нБР |

Склеивание с последующей совулканизацией листовых субстратов нБР мастикой в присутствии ПХДО и MnO_2 также позволило увели-

чить прочность связи при расслаивании в полтора раза (таблица 12, пп. 5, 7 и рисунок 8), что в 1,5 раза выше, чем при использовании ГПО.

Таблица 12. Прочность при расслаивании системы «регенерат-резина» и «регенерат-регенерат» соединенной финишным слоем мастики, отвержденных ПХДО + MnO_2

Table 12. Delamination strength of the regenerate-rubber and regenerate-regenerate systems connected by a finishing layer of mastic cured with PCB + MnO_2

| $G_{рас}$, кН/м | Тип разрушения / Type of destruction |
|--|---|
| 5) Регенерат-резина: товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO_2 (5% на БК) | |
| 0,63-0,80 | Адгезионный – следы мастики остались на регенерате |
| 7) Регенерат-регенерат: товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO_2 (5% на БК) | |
| 1,3-1,4 | Когезионный – следы мастики распределились по обеим полоскам регенерата |



Рисунок 8. Влияние природы окислителя вулканизирующей группы на тип расслаивания совулканизированных соединений

Figure 8. Influence of the nature of the oxidizer of the vulcanizing group on the type of delamination of vulcanized compounds

4. Изучение деформируемости двухслойного покрытия, наполненного нБР

Особенностью температурных швов в бетонных сооружениях является изменение зазора меж плит в зимний и летний периоды.

Представляет интерес оценка деформационных показателей герметика в присутствии эластичного наполнителя.

Определение деформационных показателей осуществлялось на сжимающем пластометре с массой сжимающего груза 5 кг (49 Н) при комнатной температуре.

Установлено, что при удельной нагрузке $\sigma = 0,08$ МПа, деформация сжатия (ϵ_c) герметизирующего образца, на основе крошки наполненного бентонитом бутилрегенерата достигала 26%, а остаточная деформация (ϵ_d) после восстановления составила 9,1-11,1% (таблица 13).

Установлено, что при удельной нагрузке $\sigma = 0,08$ МПа, деформация сжатия (ϵ_c) герметизирующего образца, на основе крошки наполненного бентонитом бутилрегенерата достигала 26%, а остаточная деформация (ϵ_d) после восстановления составила 9,1-11,1% (таблица 13).

Таблица 13. Деформационные показатели сжатия двухслойных покрытий на основе товарного БК (финишный слой), наполненного крошкой нБР (грунтовый слой), отвержденных ПХДО + MnO₂

Table 13. Deformation parameters of compression of two-layer coatings based on commercial BC (finishing layer) filled with nBR crumbs (ground layer), cured PCBs + MnO₂

| $\epsilon_d, \%$ | $\sigma, \text{МПа}$ | $\epsilon_c, \%$ |
|--|----------------------|------------------|
| 19) Компонент А: товарный БК + набухший нБР в бензине + ПХДО (5% на БК), Компонент Б: товарный БК + нБР в бензине + MnO ₂ (5% на БК) – грунтовый слой; 9) товарный БК + ПХДО (5% на БК) + MnO ₂ (5% на БК) – финишный слой | | |
| 26,0 | 0,08 | 9,1-11,1 |

Выводы

Усовершенствованы составы, технология получения и применения мастик низкотемпературного отверждения на основе бутилкаучука с повышенными деформационными свойствами.

Отработаны рецептуры и стадийность получения покрытий герметизирующих мастик низкотемпературного отверждения обеспечивающие повышенные эксплуатационные показатели.

Подобраны условия отверждения и составы мастик, обеспечивающие требуемые эксплуатационные характеристики покрытий и

герметизирующих швов по атмосферостойкости применительно к портовым сооружениям и строительной отрасли.

Предложено использование в качестве эластичного наполнителя в матрице товарного БК крошки наполненного бутилрегенерата или некондиционного бутадиен-стирольного ТЭП. Наполнение герметика такой крошкой улучшило его деформируемость при сохранении упруго-прочностных показателей. При получении бутилкаучуковых мастик низкотемпературного отверждения осуществлена замена гетерогенного окислителя оксид марганца на гомогенный –органическую гидроперекись.

Литература

- 1 Царева Е. Е. Свойства и применение эластомерных композиций // Вестник Казанского технологического университета. 2012. №5.
- 2 Хакимуллин, Ю. Н. Неотверждаемые герметизирующие композиции на основе бутилкаучука : монография / Ю. Н. Хакимуллин, М. С. Лисаневич, Р. Ю. Галимзянова. — Казань : КНИТУ, 2017. — ISBN 978-5-7882-2235-6.
- 3 Саламатов, В. И. Материаловедение неметаллических материалов : учебное пособие / В. И. Саламатов, Н. О. Тютрин ; составитель О. В. Мельниченко. — Иркутск : ИРНИТУ, 2021. — 94 с.
- 4 ГОСТ 25621-83 Материалы и изделия полимерные строительные герметизирующие и уплотняющие. Классификация и общие технические требования. Введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 17 января 1983 г. N 12 срок введения установлен с 01.07.83. — с. 10.
- 5 Синтетический каучук. Под ред. И. В. Гармонова. Л., «Химия», 2010. 744 с.
- 6 Седых, В.А. Технология производства каучуков растворной полимеризации [Текст.] : учеб. пособие / В.А. Седых, А.В. Гусев, В.А. Разумов и [др.]; -Воронеж. гос. технол. акад. – Воронеж :2010. 308 с.
- 7 Исаев, Г.В.. Низкотемпературное структурирование хлорсодержащих каучуков хинондноксимными системами / Исаев Г.В., Седых В.А., Шутилин Ю.Ф.; Воронеж, гос. технол. акад. - Воронеж, 1999. - 38 с: - Деп. в ВИНТИ, Москва, 17.05.99, № 1617 - В99.
- 8 Исаев, Г.В. Создание композиции для низкотемпературной вулканизации малонепредельных каучуков и их отходов. автореф. дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н./Г.В. Исаев. Воронеж. 2000. 160 с.
- 9 Макаров, Т.В. Получение, свойства и применение эластомерных композиций, вулканизованных динитрозогенерирующими системами. дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. : 0517.06 : защищена 2005 /Т.В. Макаров. Казань. 2005. 129 с.
- 10 Ключников О.Р. С-нитрозо-N-оксидные системы вулканизации непредельных каучуков : дисс. на соиск. уч. степ. д-ра хим. наук : 0517.06 : защищена 2005 / О.Р. Ключников. – Казань, 2005. -236 с.
- 11 Ключников О.Р. С-Нитрозные системы вулканизации и новые эластомерные композиционные материалы // Вестник Казанского технологического университета. 2014.Т 17. №3. –С.135-143
- 12 Дик Дж.С. Как улучшить резиновые смеси. 1800 практических рекомендаций для решения проблем. Пер. с англ./под ред. Б.Л. Смирнова. СПб.: Профессия,2016.352с.
- 13 Свойства резин на основе радиационного регенерата бутилкаучука и возможности их применения / Р.Р. Вагизова [и др.] //Каучук и резина. – 2006. – № 5. – С. 38-41.
- 14 Применение бутилрегенерата для кровельных и гидроизоляционных материалов / Р.Р. Вагизова [и др.] //Строительные материалы.–2007.–№6.– С.62-64.20.
- 15 ГОСТ 28177-89 Глины формовочные бентонитовые. Общие технические условия. Разработан и внесен Министерством станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.06.89 N 2263. Взамен ГОСТ 3226-77 и ГОСТ 3594.(0-12)-77 в части бентонитовых глин. – с. – 22.
- 16 ГОСТ 263-75 Резина. Метод определения твердости по Шору А. разработан и внесен Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 21.01.75 N 115. Взамен ГОСТ 263-53. – с. 7.
- 17 ГОСТ 270-75 Резина. Метод определения упруго-прочностных свойств при растяжении. Разработан и внесен Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 13.11.1975 N 2852. Взамен ГОСТ 270-64. – с. 11.
- 18 ГОСТ 6768-75 Резина и прорезиненная ткань. Метод определения прочности связи между слоями при расслоении. Разработан и внесен Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 16.04.75 N 966. Взамен ГОСТ 6768-53 и ГОСТ 12255-66. – с. 7.
- 19 ГОСТ Р ИСО 815-2-2017 РЕЗИНА И ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТЫ Определение остаточной деформации при сжатии. Москва. Стандартиформ, 2017. 20 с.

References

- 1 Tsareva E. E. Properties and application of elastomer compositions // Bulletin of Kazan Technological University. 2012. No. 5.
- 2 Khakimullin, Yu. N. Non-curing sealing compositions based on butyl rubber: monograph / Yu. N. Khakimullin, M. S. Lisanevich, R. Yu. - Kazan: KNITU, 2017. - ISBN 978-5-7882-2235-6.
- 3 Salamatov, V. I. Materials science of non-metallic materials: a tutorial / V. I. Salamatov, N. O. Tyutrin; compiled by O. V. Melnichenko. - Irkutsk: IRNITU, 2021. - 94 p.
- 4 GOST 25621-83 Polymer building sealing and weatherstripping materials and products. Classification and general technical requirements. Put into effect by the Resolution of the USSR State Construction Committee dated January 17, 1983 N 12; the term of introduction is set from July 1, 1983. – p. 10.
- 5 Synthetic rubber. Ed. by I. V. Garmonov. L., "Chemistry", 2010. 744 p.
- 6 Sedykh, V. A. Technology of production of rubbers by solution polymerization [Text]: textbook / V. A. Sedykh, A. V. Gusev, V. A. Razumov and [others]; -Voronezh. state techn. academy. - Voronezh: 2010. 308 p.
- 7 Isaev, G.V. Low-temperature structuring of chlorine-containing rubbers by quinone noxyme systems / Isaev, G.V., Sedykh, V.A., Shutilin, Yu.F.; Voronezh, State Technological Academy - Voronezh, 1999. - 38 p.: - Dep. in VINITI, Moscow, 17.05.99, No. 1617 - B99.
- 8 Isaev, G.V. Creation of a composition for low-temperature vulcanization of low-unsaturated rubbers and their waste. author's abstract. diss. for a Ph.D. thesis / G.V. Isaev. Voronezh. 2000. 160 p.
- 9 Makarov, T.V. Production, properties and application of elastomer compositions vulcanized by dinitrosogenerating systems. diss. for a PhD in Engineering: 0517.06: protected 2005 / T.V. Makarov. Kazan. 2005. 129 p.
- 10 Klyuchnikov O.R. C-nitroso-N-oxide vulcanization systems of unsaturated rubbers: diss. for a PhD in Chemistry: 0517.06: protected 2005 / O.R. Klyuchnikov. – Kazan, 2005. -236 p.
- 11 Klyuchnikov O.R. C-Nitroso vulcanization systems and new elastomeric composite materials // Bulletin of the Kazan Technological University. 2014. Vol. 17. No. 3. – P. 135-143
- 12 Dick J.S. How to improve rubber mixtures. 1800 practical recommendations for solving problems. Transl. English / edited by B.L. Smirnov. SPb.: Profession, 2016. 352 p.
- 13 Properties of rubbers based on radiation reclaimed butyl rubber and the possibilities of their application / R.R. Vagizova [et al.] // Rubber and rubber. - 2006. - No. 5. - P. 38-41.
- 14 Application of butyl reclaim for roofing and waterproofing materials / R.R. Vagizova [et al.] // Construction materials. - 2007. - No. 6. - P. 62-64.20.
- 15 GOST 28177-89 Bentonite molding clays. General specifications. Developed and introduced by the Ministry of Machine Tool and Tool Industry of the USSR. Approved and put into effect by Resolution of the State Standards Committee of the USSR dated 29.06.89 N 2263. Replaces GOST 3226-77 and GOST 3594.(0-12)-77 in terms of bentonite clays. – p. – 22.
- 16 GOST 263-75 Rubber. Method for determining Shore A hardness was developed and submitted by the USSR Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry. Approved and put into effect by Resolution of the State Standards Committee of the Council of Ministers of the USSR dated 21.01.75 N 115. Replaces GOST 263-53. – p. 7.
- 17 GOST 270-75 Rubber. Method for determining elastic-strength properties under tension. Developed and submitted by the USSR Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry. Approved and put into effect by Resolution of the USSR State Standards Committee dated 13.11.1975 N 2852. Replaces GOST 270-64. – p. 11.
- 18 GOST 6768-75 Rubber and rubberized fabric. Method for determining the strength of the bond between layers during delamination. Developed and submitted by the USSR Ministry of Oil Refining and Petrochemical Industry. Approved and put into effect by Resolution of the State Standards Committee of the Council of Ministers of the USSR dated 16.04.75 N 966. Replaces GOST 6768-53 and GOST 12255-66. – p. 7.
- 19 GOST R ISO 815-2-2017 RUBBER AND THERMOELASTIC ELASTICS Determination of residual deformation under compression. Moscow. Standartinform, 2017. 20 p.

Сведения об авторах

| ФИО | Сведения (ученая степень, звание, E-mail, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов) |
|-------------------------------|---|
| Седых Валерий Александрович | кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, cdxva@mail.ru SPIN-код 6399-8852 ORCID 0000-0003-1054-6552 |
| Патенко Екатерина Михайловна | магистрант, Воронежский государственный университет инженерных технологий, студент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, patenko2001@mail.ru |
| Королева Екатерина Валерьевна | ассистент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, ассистент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, katrakoroleva@gmail.com SPIN-код 1907-7524 ORCID 0000-0001-9436-0661 |

Authors information

| Last name, first name, patronymic | Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors) |
|-----------------------------------|---|
| Sedykh Valery Aleksandrovich | PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, professor of the department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, cdxva@mail.ru SPIN-code 6399-8852 ORCID 0000-0003-1054-6552 |
| Patenko Ekaterina Mikhailovna | master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, student of the department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, patenko2001@mail.ru |
| Koroleva Ekaterina Valerievna | assistant, Voronezh State University of Engineering Technologies, assistant of department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, katrakoroleva@gmail.com SPIN-code 1907-7524 ORCID 0000-0001-9436-0661 |

| | | |
|---|---|--|
| статья поступила в редакцию 28.11.2024 | одобрена после рецензирования 11.12.2024 | принята к публикации 23.12.2024 |
| the article was submitted 28.11.2024 | approved after reviewing 11.12.2024 | accepted for publication 13.12.2024 |

