

ISSN 2949-6241

e-ISSN 2949-6233

Инженерные Технологии



№ 2 (10) 2025

16+

ИНЖЕНЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 2 (10), 2025

16+

ENGINEERING TECHNOLOGIES
SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL
№ 2 (10), 2025

Главный редактор

Битюков Виталий Ксенофонович – 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 Ксенофонович, 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 27.06.2025.

Выход в свет: 30.06.2025.

Формат 70x100 1/8

Усл. печ. л. 12,25. Тираж 100 экз. Заказ №

Цена - свободная

© ФГБОУ ВО

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editors-in-Chief

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

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

Scientific and Editorial Board:

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

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

Boreyko Natalia Pavlovna, Doctor of Technical Sciences, Advisor to the Director of the S.V. Lebedev Scientific Research Institute of Synthetic Rubber (St. Petersburg, Russia), 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 27.06.2025.

The publication: 30.06.2025.

Format 70 x 100 1/8

Usl. pech. l. 12,25. Edition of 100 copies. Order No.

Price - free

© FSBEI HE

«Voronezh State University of
Engineering and Technology»,
2025

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и телекоммуникации

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ УСПЕВАЕМОСТИ ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО РЕЙТИНГА <i>Гревцов М. А., Феоктистова Н. А.</i>	15
ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАНАХ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АНГОЛА <i>Коробова Л. А., Кибанга А. Ф.</i>	22
ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ АНГОЛА <i>Ивлиев М. Н., Кибанга А. Ф.</i>	28
ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ <i>Симонов С. Е.</i>	36
ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ БОТОВ <i>Жданов С. В., Коробова Л. А.</i>	47

Химические технологии, науки о материалах

МОДИФИКАЦИЯ АДГЕЗИОННОГО ГРУНТА В КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ РЕЗИНА : МЕТАЛЛ <i>Седых В. А., Крюков В. А., Дыбова Д. Р.</i>	56
РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ЗАВЕРШЁННОСТИ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>Тихомиров С. Г., Маслов А. А., Карманова О. В., Другова О. А., Мысливец М. Н., Донгаева М. В.</i>	69
ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ <i>Комарова Е. В., Болотов В. М., Саввин П. Н.</i>	80
ПРОВЕДЕНИЕ КОАГУЛЯЦИИ ЛАТЕКСА БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА СОЛЮ МЕЛАМИНА БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ <i>Мякишева А. В., Моргачева Е. А., Санникова Н. Ю., Пугачева И. Н., Никулин С. С.</i>	86
СИНТЕЗ МЕЛАНОИДИНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>Болотов В. М., Воронцов И. Н.</i>	93

CONTENTS

Information technology and telecommunications

A SYSTEMATIC APPROACH TO ASSESSING ACADEMIC PERFORMANCE BASED ON NONLINEAR RATING <i>Grevtsov M. A., Feoktistova N. A.</i>	15
ORGANIZATION OF FIFTH GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS IN DEVELOPING COUNTRIES ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF ANGOLA <i>Korobova L. A., Kibanga A. F.</i>	22
AN EMPIRICAL APPROACH TO BUILDING TELECOMMUNICATION NETWORKS IN THE REPUBLIC OF ANGOLA <i>Ivliev M. N., Kibanga A. F.</i>	28
SIMULATION MODEL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR <i>Simonov S. E.</i>	36
JUSTIFICATION OF DEVELOPMENT OF A DOMESTIC PLATFORM FOR USE OF BOTS <i>Zhdanov S. V., Korobova L. A.</i>	47

Chemical technologies, materials sciences

THE MODIFICATION OF THE ADHESIVE PRIMER IN THE ADHESIVE JOINT RUBBER : METAL <i>Sedykh V. A., Kryukov V. A., Dybova D. R.</i>	56
CALCULATION OF THE DEGREE OF COMPLETION OF THE VULCANIZATION PROCESS USING THE EXAMPLE OF MULTILAYER RUBBER PRODUCTS FOR HEAVY INDUSTRY <i>Tikhomirov S. G., Maslov A. A., Karmanova O. V., O. A. Drugova O. A., Myslivets M. N., Dongaeva M. V.</i>	69
PRODUCTION OF NEW PHARMACEUTICAL PREPARATIONS WITH ORGANIC BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS <i>Komarova E. V., Bolotov V. M., Savvin P. N.</i>	80
COAGULATION OF STYRENE BUTADIENE RUBBER LATEX WITH MELAMINE SALT WITHOUT THE USE OF SULFURIC ACID <i>Myakisheva A. V., Morgacheva E. A., Sannikova N. Yr., Pugacheva I. N., Nikulin S. S.</i>	86
SYNTHESIS OF MELANOIDIN COMPOUNDS FOR USE IN THE FOOD INDUSTRY <i>Bolotov V. M., Vorontsov I. N.</i>	93

Научная статья

УДК 378.146

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ УСПЕВАЕМОСТИ ОБУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО РЕЙТИНГА**

Максим Александрович Гревцов ¹

snep.snepik@gmail.com

Наталья Андреевна Феоктистова ² ✉

feofamilynat@yandex.ru

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

²Российская Академия Образования, Погодинская ул., 8, Москва, 119121, Россия

Аннотация. Рассмотрена проблема, связанная с методом линейного балльно-рейтингового оценивания успеваемости обучающихся, заключающаяся в вырождении – совокупность различных оценок приводит к коллизиям – одинаковым рейтингам. Показано, что метод нелинейного оценивания позволяет снизить количество коллизий. Описана информационная технология формирования рейтинга на основе нелинейного оценивания. Предложены пути реализации программной системы метода нелинейного оценивания для его широкого использования в среднем и высшем образовании.

Ключевые слова: нелинейное оценивание, рейтинг успеваемости, коллизии оценок, математическое моделирование, цифровизация образования.

Для цитирования: Гревцов М. А., Феоктистова Н. А. Системный подход к оцениванию успеваемости обучения на основе нелинейного рейтинга // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 15-21.

Original article

**A SYSTEMATIC APPROACH TO ASSESSING ACADEMIC PERFORMANCE
BASED ON NONLINEAR RATING**

Maksim A. Grevtsov ¹

snep.snepik@gmail.com

Natalia A. Feoktistova ² ✉

feofamilynat@yandex.ru

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

²Russian Academy of Education, Pogodinskaya st., 8, Moscow, 119121, Russia

Annotation. The article examines the problem associated with the method of linear point-rating assessment of students' academic performance, which consists of degeneration – the combination of different assessments leads to collisions – identical ratings. It is shown that the nonlinear estimation method allows to reduce the number of collisions. The information technology for forming a rating based on nonlinear assessment is described. The ways of implementing the software system of the nonlinear assessment method for its wide use in secondary and higher education are proposed.

Keywords: nonlinear assessment, academic performance rating, assessment collisions, mathematical modeling, digitalization of education.

For citation: Grevtsov M. A., Feoktistova N. A. A systematic approach to assessing academic performance based on nonlinear rating. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 15-21. (In Russ.).

Введение

В современном образовании, как в среднем, так и в высшем, принята простая шкала для оценивания успешности обучения по различным разделам дисциплин, основанная на традиционных оценках (3-4-5). Однако, многие исследователи считают, что данная шкала является номинальной, в которой нельзя проводить арифметические действия с числами [1]. Тем не менее, в образовательной практике, к традиционным оценкам применяют правила шкалы отношений, производя различные математические действия [2]. Широко распро-

странена практика, в которой производят усреднение оценок, рассчитывают их средне-взвешенные значения [2, 3]. Так, рейтинги успеваемости рассчитывают именно методом линейного оценивания на основе средневзвешенных значений [4].

Как показано в [5], использование рейтингов или индексов, рассчитанных на основе метода линейного оценивания, приводит к коллизиям или вырождению: возможны случаи, когда различные комбинации оценок (показателей, индикаторов) формируют один и тот же рейтинг. Например, один учащийся получил по

различным разделам математики оценки 4, 4, а другой – 5, 3. Таким образом, линейные рейтинги не позволяют различать учащихся, что иногда важно при их премировании, выборе индивидуальной траектории обучения [6] или устройстве на работу.

Цель работы – разработка и апробация системного подхода к оцениванию успеваемости обучения на основе архитектуры нелинейного рейтинга, учитывающего множество факторов успеваемости, их взаимосвязи и динамику образовательного процесса. Задачи исследования включают: анализ ограничений и рисков применения линейных балльно-рейтинговых систем; формализацию принципов построения нелинейной рейтинговой модели как компонента информационной системы образовательной

аналитики; обоснование и апробацию методов минимизации коллизий и повышения объективности итогового рейтинга; разработку сценариев интеграции нелинейных рейтинговых индексов в программные комплексы поддержки образовательных процессов; сравнение полученных результатов с традиционными методами, оценка потенциала внедрения в массовую практику.

Нелинейное оценивание

Возможные коллизии легко объяснить графически на рисунках 1 и 2, показывающих, что линейное оценивание проецирует множество показателей в точку (рисунок 1), в то время как нелинейное оценивание – в множество рейтингов (рисунок 2).

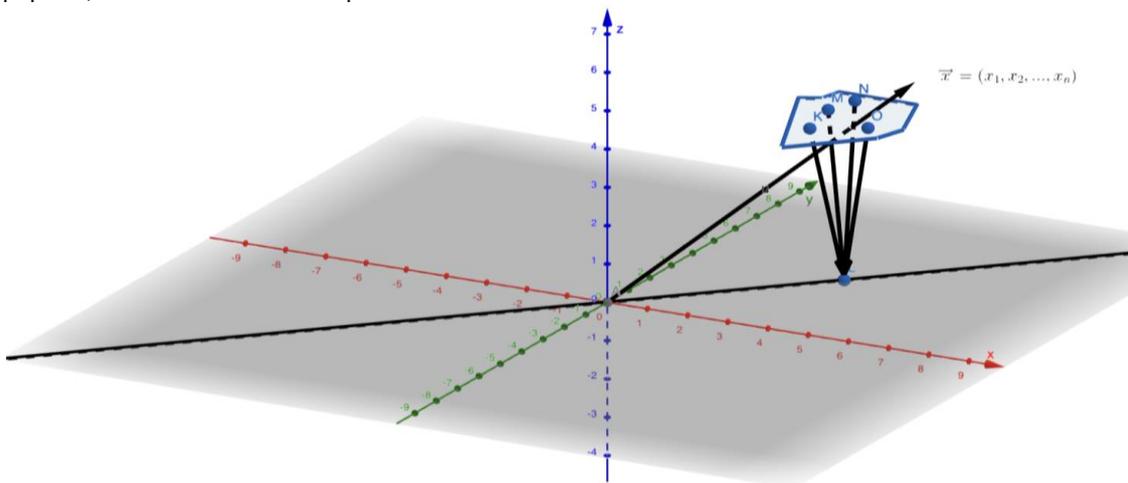


Рисунок 1. Принцип конвертации (проекции) множества традиционных оценок в итоговый рейтинг при использовании метода линейного оценивания

Figure 1. The principle of converting (projection) a set of traditional ratings into a final rating using the linear estimation method.

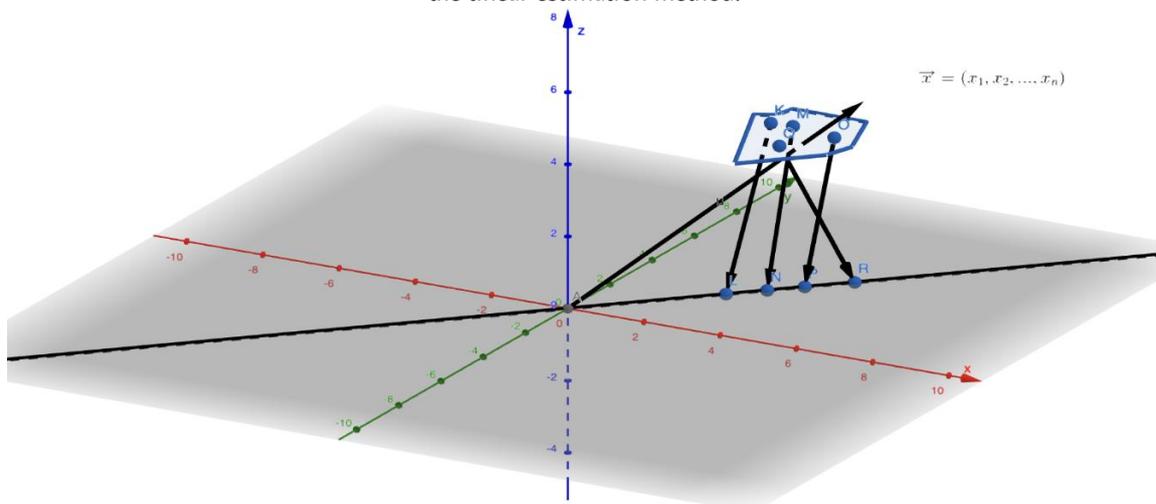


Рисунок 2. Принцип конвертации(проекции) множества традиционных оценок в итоговый рейтинг при использовании метода нелинейного оценивания

Figure 2. The principle of converting (projection) a set of traditional ratings into a final rating using the nonlinear estimation method.

В [5] предложено использовать метод нелинейного оценивания, снимающий вырождение. Данный метод основан на теории статистических решений (метод максимального правдоподобия) [7].

Метод нелинейного оценивания, описанный в [5] для перевода традиционных оценок в рейтинги, в отличие от метода линейного оценивания, где рейтинг формируется как взвешенное значение традиционных оценок, учитывает не только сами оценки, но и их отклонения от идеального результата. Это позволяет избежать вырождения, присущего линейным методам.

Для нелинейного оценивания используется индекс (нелинейный рейтинг), который характеризует степень близости вектора наблюдений $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ к идеальному вектору оценок $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$. Формула для расчета нелинейного рейтинга имеет вид [5]:

$$y_{nonlin}^{(1)} = \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^N a_n \frac{(x_n - s_n)^2}{\sigma_n^2}}, \sum_{n=1}^N a_n, \quad (1)$$

где x_n – традиционная оценка;

a_n – вес (значимость) n -ной оценки;

s_n – максимальная оценка;

σ_n – стандартное отклонение;

N – количество оценок.

Нелинейный рейтинг (1) соответствует степени близости полученных оценок к максимально возможным результатам. Чем ближе оценки к максимальным, тем выше значение рейтинга. Это снижает число возможных коллизий.

Заметим, что веса a_n возможно выбрать возрастающими в соответствии с временным порядком обучения, что позволит учесть прогресс в обучении. Обратим внимание и на то, что рейтинг (1) является хеш-функцией для набора традиционных оценок. Известно, что создать хеш-функцию, не обладающую коллизиями, создать невозможно, поскольку множество значений хеш-функции меньше множества её аргументов [8]. Отсюда следует, что принцип расчета рейтинга (1) не является единственным.

Рассматривая хеш-функцию как отображение набора оценок в одно итоговое рейтинговое значение или индекс, удовлетворяющий условию минимального количества коллизий, данное отображение возможно выбрать из классов обобщённых статистических, метрических и энтропийных функций [5, 2, 3, 7]. В частности, в [3] отмечается эффективность

хеш-подобных преобразований, которые способствуют минимизации коллизий.

В качестве хеш-функции для системы нелинейного оценивания используем нормированное нелинейное преобразование с применением экспоненциальной функции, что уже встречается в работах по обработке образовательных данных [3]. Приведём пример конкретного выражения, основанного на экспоненциальной функции от взвешенной квадратичной метрики:

$$y_{nonlin}^{(2)} = \exp\left(\sum_{n=1}^N a_n \frac{(x_n - s_n)^2}{\sigma_n^2}\right). \quad (2)$$

Функция (2) возрастает для векторов, близких к идеальному результату (все оценки равны s_n). Для любого набора, с хотя бы одной заниженной оценкой, результат снижается. Экспоненциальный характер максимально «различает» схожие, но не идентичные векторы, тем самым минимизируя коллизии.

Математическая конструкция опосредует вклад статистических отклонений (σ учитывает вариабельность оценок, что обосновано в педагогической статистике [1, 2, 7]).

Отметим, что подобные по строению функции используются и для задач статистического сжатия информации (см., например, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404820313196> для хеширования в криптографии). В контексте образовательной аналитики нелинейное экспоненциальное нормирование традиционных оценок разрабатывалось и рекомендовалось в [3,5]. Нелинейное оценивание также проводилось с использованием нейросетевых технологий [8].

На практике, алгоритмы построения рейтинговых шкал с использованием таких функций уже реализуются в образовательных аналитических платформах, например, LMS Canvas, Moodle, для ранжирования студентов с альтернативными весами оценок.

Таким образом, внедрение в программную систему функции нелинейного преобразования вида (2) позволит минимизировать количество коллизий и добиться более объективного и дифференцированного оценивания обучающихся. Предложенная хеш-функция расширяет спектр математических инструментов качественной диагностики в образовании [3, 4].

На рисунках 3 и 4 приведено сравнение гистограмм получаемых рейтингов для методов линейного и двух нелинейных рассматриваемых методов приведения оценок к итоговому рейтингу.

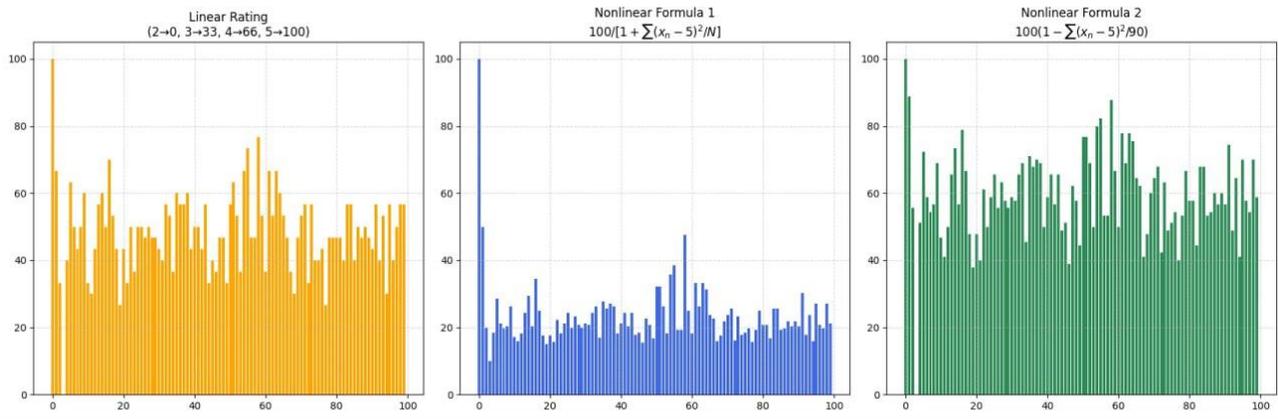


Рисунок 3. Сравнение рейтингов, получаемых при одном и том же наборе оценок с использованием трех рассматриваемых подходов

Figure 3. Comparison of ratings obtained with the same set of ratings using the three approaches considered

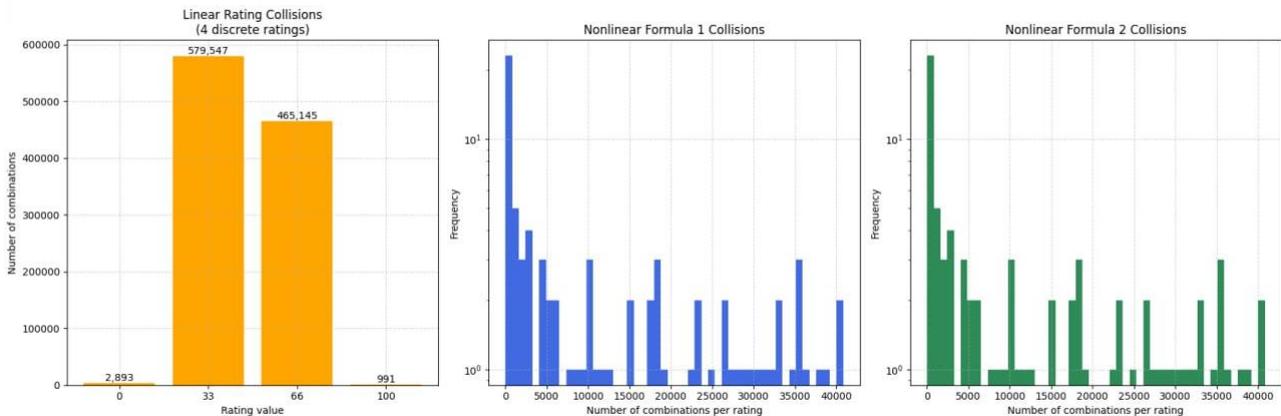


Рисунок 4 Сравнение количества коллизий и уникальных рейтингов при одном и том же наборе оценок с использованием трех рассматриваемых подходов

Figure 4 Comparison of the number of collisions and unique ratings for the same set of ratings using the three approaches considered

Таким образом, при использовании нелинейного метода оценивания, можно выделить следующие ключевые преимущества:

- Снижение коллизий в 3.5 раза по сравнению с линейным методом;
- Учет прогресса обучения через временные веса a_n ;
- Возможность адаптации под различные образовательные контексты.

Внедрение в программную систему функции нелинейного преобразования позволит минимизировать количество коллизий и добиться более объективного и дифференцированного оценивания обучающихся. Предложенная хеш-функция расширяет спектр математических инструментов квалиметрической диагностики в образовании.

Выражение (2) удобно использовать для оценивания рейтинга, соответствующего одной

зачетной единице. Для оценивания успеваемости по двум зачётным единицам, на основании рейтингов y_1 и y_2 , возможно использовать комбинированный рейтинг [8]:

$$y_{1,2} = \frac{w_1 y_1 + w_2 y_2 - w_1 w_2 y_1 y_2}{w_1 + w_2 - w_1 w_2}, \quad (3)$$

где w_1 и w_2 – значимости соответствующих рейтингов ($w_1 + w_2 = 1$).

Для оценивания успеваемости с учётом большего числа зачетных единиц, возможно рекуррентно использовать выражение (3) [8]:

$$y_{1,2,3} = \frac{w_{12} y_{12} + w_3 y_3 - w_{12} w_3 y_{12} y_3}{w_{12} + w_3 - w_{12} w_3} \quad (4)$$

где ($w_{12} + w_3 = 1$). Смысл данного выражения наглядно поясняет нейроразобная диаграмма рисунка 5.

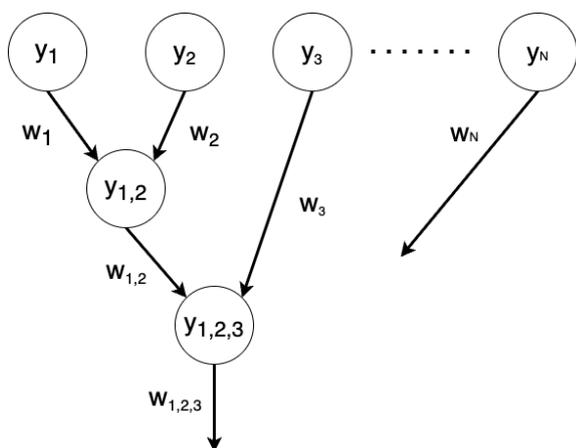


Рисунок 5. Рекуррентное оценивание рейтингов

Figure 5. Recurrent rating assessment

Для реализации рассмотренной информационной технологии предложена программная система, состоящая из следующих компонентов:

- подсистема ввода данных: для загрузки оценок учащихся, их весов и других параметров (например, стандартных отклонений),
- подсистема расчета рейтингов: реализующий формулы (1) и (2) для нелинейного преобразования оценок,
- подсистема визуализации: для отображения рейтингов, гистограмм и сравнения результатов,
- подсистема интеграции: обеспечивающий взаимодействие с существующими образовательными платформами (LMS Moodle, Canvas и др.).

Реализация программной системы на основе нелинейного оценивания позволит значительно повысить точность и объективность оценки успеваемости, минимизировать коллизии и адаптировать процесс обучения под индивидуальные потребности учащихся. Внедрение таких технологий соответствует современным тенденциям цифровизации образования и открывает новые возможности для анализа образовательных данных, так как упрощает оценивание результатов образования.

Нелинейный рейтинговый индекс как элемент системной модели

В отличие от традиционного линейного усреднения, приводящего к вырождению и потере чувствительности рейтингового индекса к структуре индивидуальных достижений, нелинейный подход реализует многомерное преобразование с акцентом на соответствие идеальному результату и учёт отклонений по каждому из параметров. Формула такого рейтинга (см. выражения (1) – (2)) строится с примене-

нием взвешенных квадратичных метрик и экспоненциальной нормализации, обеспечивая высокую разрешающую способность рейтинга относительно структуры исходных данных. В качестве системного фактора учитываются весовые коэффициенты, отражающие значимость отдельных элементов образовательной программы (например, контрольных мероприятий, лабораторных работ, самостоятельной работы), а также параметры вариации (стандартное отклонение), отражающие стабильность достижений учащегося.

Нелинейный рейтинг можно трактовать и как элемент архитектуры динамической системы, где на каждом этапе обучения интеграция новых результатов происходит с учетом всей накопленной траектории, что реализуется через рекуррентное вычисление комбинированных индексов (см. выражения (3), (4)). Такая схема позволяет выстраивать индивидуальную образовательную траекторию оценки и отслеживать ее динамику.

Сравнительный анализ и апробация системной модели

Анализ результатов применения системного нелинейного рейтинга приводился на тестовых и реальных наборах данных. Как показывают гистограммы (рис. 3, 4), предложенная модель существенно снижает количество коллизий (в 3,5 раза относительно линейных методов), дифференцирует студентов по уровню успешности даже при схожих наборах исходных оценок, позволяет выявлять случаи быстрого прогресса или стагнации в обучении.

Особенностью системного подхода является возможность адаптации параметров рейтинговой модели под конкретные образовательные задачи: индивидуальный учёт "сложных" дисциплин, динамическое взвешивание контрольных точек, автоматическое построение рейтингов нестандартных траекторий (например, индивидуальных образовательных маршрутов студентов с разными стартовыми условиями).

Технологические аспекты реализации

Ключевая задача – интеграция нелинейного рейтингования как расчётного ядра в структуру информационной образовательной системы (Модули LMS, электронные журналы, инсайты образовательной аналитики). Для этого в предложенной программной системе реализованы подсистемы: сбора и валидации данных; параметризации весов и показателей; визуализации и мониторинга индивидуального и группового прогресса; интеграции с внешними

источниками данных. Это повышает управляемость образовательным процессом, расширяет возможности персонализации и оперативного вмешательства на основе объективных метрик.

Заключение

В работе представлен системный подход к оцениванию успеваемости обучения, основанный на использовании нелинейного рейтингового индекса с минимизацией коллизий и учётом множества характеристик учебной деятельности. Разработанная методология и программная система позволяют решать широкий спектр задач образовательного анализа: от ранжирования и премирования до индивидуализации и диагностики рисков. Показано,

что внедрение системной модели рейтингования приводит к повышению объективности, прозрачности и управляемости образовательного процесса, соответствует современным тенденциям цифровой трансформации образования и рекомендациям образовательной аналитики. Перспективы дальнейших исследований связаны с тиражированием подхода на уровень автоматизированных платформ, применением новых метрик (в том числе, на основе машинного обучения), расширением области применения в разных уровнях образования и научного сопровождения цифровых образовательных сред.

Литература

1. Статистические методы в педагогических исследованиях (типовые случаи) [Электронный ресурс]: монография / Д. А. Новиков. – Электрон. текстовые дан. - Москва: МЗ-Пресс, 2004. - 67 с. on-line. - ISBN 5-94073-073-6. - (Статистические методы). – URL: <http://www.iprbookshop.ru/8501.html>
2. Портнова А.Г. Использование математических методов для мониторинга качества успеваемости студентов / А.Г. Портнова, С.Л. Лесникова, Н. А. Русакова // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки. 2020. - Т. 4. - No 3. – С. 218–226.
3. Azgaldov Garry G., Kostin Alexander V., Padilla Omiste Alvaro E. The ABC of Qualimetry: the Toolkit for measuring the immeasurable. ParaType, Inc. – Ridero, 2015. – 167 p. – URL: http://www.labrate.ru/books/20150831_the_abc_of_qualimetry-text-cc-by-sa.pdf
4. Справочник учебного процесса НИУ ВШЭ: студенческий рейтинг [Электронный ресурс] // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – URL: <https://www.hse.ru/studyspravka/rate> (дата обращения: 16.05.2025)
5. Краснов А. Е. Информационные технологии перевода традиционных оценок в рейтинги / А. Е. Краснов, С. В. Пивнева, Н. А. Феоктистова // Информатизация образования и науки. – 2020. – № 2(46). – С. 3-14.
6. Краснова Т.Н. Феоктистова Н.А. Цифровое обеспечение оценивания знаний как психологическая поддержка индивидуальной траектории обучения // Герценовские чтения: психологические исследования в образовании. – 2021. – No 4. – С. 298-303. – DOI 10.33910/herzenpsyconf-2021-4-36.
7. Одилова Ш.С., Захидов Д. Метод максимального правдоподобия для идентификации сообществ в сети на графах // Вестник аграрной науки Узбекистана. – 2023. – No 2(8/2). – С. 103-106. - URL: chrome-extension://efaidnbnmnbbpcjpcglclefindmkaj/https://uniwork.buxdu.uz/resurs/13222_1_344E3A9B98C02747B00F7FFC397FE011D3424A7A.pdf
8. Краснов А.Е., Сагинов Ю.Л., Феоктистова Н.А. Количественное оценивание качества многопараметрических объектов и процессов на основе нейросетевой технологии // Информационные технологии, менеджмент качества, информационная безопасность: Материалы Всерос. конф. (IT&MQ&IS-2015). 20–25 мая 2015 г. Учебно-научная база КБГУ в Приэльбрусье (п. Эльбрус) / Приложение к журналу «Качество. Инновации. Образование». 2015. № 5. Т. 2, С. 97–108.

References

1. Statistical methods in pedagogical research (typical cases) [Electronic resource]: monograph / D. A. Novikov. - Electronic text data. - Moscow: MZ-Press, 2004. - 67 p. on-line. - ISBN 5-94073-073-6. - (Statistical methods). – URL: <http://www.iprbookshop.ru/8501.html>
2. Portnova A.G. Using Mathematical Methods to Monitor the Quality of Students' Academic Performance / A.G. Portnova, S.L. Lesnikova, N. A. Rusakova // Bulletin of Kemerovo State University. Series: Humanities and Social Sciences. 2020. - Vol. 4. - No. 3. - P. 218–226.
3. Azgaldov Garry G., Kostin Alexander V., Padilla Omiste Alvaro E. The ABC of Qualimetry: the Toolkit for measuring the immeasurable. ParaType, Inc. – Ridero, 2015. – 167 p. – URL: http://www.labrate.ru/books/20150831_the_abc_of_qualimetry-text-cc-by-sa.pdf

4. Handbook of the educational process of the National Research University Higher School of Economics: student rating [Electronic resource] // National Research University Higher School of Economics. – URL: <https://www.hse.ru/studyspravka/rate> (date of access: 16.05.2025)

5. Krasnov A. E. Information technologies for converting traditional assessments into ratings / A. E. Krasnov, S. V. Pivneva, N. A. Feoktistova // Informatization of education and science. - 2020. - No. 2 (46). - P. 3-14.

6. Krasnova T.N. Feoktistova N.A. Digital support for knowledge assessment as psychological support for an individual learning trajectory // Herzen Readings: Psychological Research in Education. - 2021. - No. 4. - P. 298-303. - DOI 10.33910/herzenpsyconf-2021-4-36.

7. Odilova Sh.S., Zakhidov D. Maximum likelihood method for identifying communities in a network on graphs // Bulletin of agrarian science of Uzbekistan. - 2023. - No. 2 (8/2). - P. 103-106. - URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://uniwork.buxdu.uz/resurs/13222_1_344E3A9B98C02747B00F7FFC397FE011D3424A7A.pdf

8. Krasnov A.E., Saginov Yu.L., Feoktistova N.A. Quantitative assessment of the quality of multiparametric objects and processes based on neural network technology // Information technology, quality management, information security: Proceedings of the All-Russian Conference (IT&MQ&IS-2015). May 20-25, 2015. The educational and scientific base of KBSU in the Elbrus region (Elbrus settlement) / Appendix to the journal "Quality. Innovation. Education". 2015. No. 5. Vol. 2, pp. 97-108.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Гревцов Максим Александрович	магистр, МИРЭА - Российский технологический университет, snep.snepik@gmail.com
Феоктистова Наталья Андреевна	кандидат технических наук, Российская академия образования (Центр развития образования), главный эксперт лаборатории научных подходов в управлении образовательными системами, feofamilynat@yandex.ru SPIN-код: 2132-4482 ORCID: 0000-0002-0030-7390

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Grevtsov Maksim Aleksandrovich	Master's Degree, MIREA Russian Technological University, snep.snepik@gmail.com
Feoktistova Natalia Andreevna	PhD, Russian Academy of Education (Center for Education Development), Chief Expert of the Laboratory of Scientific Approaches in Managing Educational Systems, feofamilynat@yandex.ru SPIN-code: 2132-4482 ORCID: 0000-0002-0030-7390

статья поступила в редакцию 29.05.2025	одобрена после рецензирования 11.06.2025	принята к публикации 20.06.2025
the article was submitted 29.05.2025	approved after reviewing 11.06.2025	accepted for publication 20.06.2025

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАНАХ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АНГОЛА

Людмила Анатольевна Коробова✉ 1
Антониу Фамороза Кибанга 1

Lyudmila_korobova@mail.ru
agufamoroso@gmail.com

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

Аннотация. С ростом спроса на сотовую связь, высокая скорость и слабая задержка сигналов, расширение сети 5G приносит значительные выгоды в плане доступа к информации, больших инноваций и экономического развития. Связь 5G может дать толчок в развивающихся странах, таких как республика Ангола, в технологической инфраструктуре и промышленном парке. Связь между густонаселенными городскими районами и сельскими местностями значительно затруднена с точки зрения телекоммуникационной инфраструктуры. Это ограничивает доступ к высокоскоростному Интернету и современным услугам связи. В ходе развертывания сетей технологии 5G в этих зонах крайне важно, чтобы исключить цифровой разрыв, предоставляя возможности более быстрой и надежной связи для местных жителей и промышленных предприятий. В Анголе развитие телекоммуникаций условно делят на два периода: колониальный и после установления независимости. Стандарты сотовой связи прошли ряд поколений. Каждый стандарт имеет свои характеристики, достоинства и недостатки. На данный момент наиболее передовой считается сотовая связь пятого поколения.

Ключевые слова: стандарты связи, связь 5G, интернет, подключение, пользователи абоненты, интернет вещей.

Для цитирования: Коробова Л. А., Кибанга А. Ф. Организация систем связи пятого поколения в развивающихся странах на примере республики Ангола // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 22-27.

Original article

ORGANIZATION OF FIFTH GENERATION COMMUNICATION SYSTEMS IN DEVELOPING COUNTRIES ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF ANGOLA

Lyudmila A. Korobova✉ 1
Antonio Famosa Kibanga 1

Lyudmila_korobova@mail.ru
agufamoroso@gmail.com

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

Abstract. With the growing demand for cellular communications, high speed and low latency signals, the expansion of the 5G network brings significant benefits in terms of access to information, greater innovation and economic development. 5G communications can give a boost to developing countries such as the Republic of Angola in terms of technological infrastructure and industrial park. Communication between densely populated urban areas and rural areas is significantly hampered in terms of telecommunication infrastructure. This limits access to high-speed Internet and modern communication services. During the deployment of 5G technology networks in these areas, it is essential to eliminate the digital divide, providing faster and more reliable communication opportunities for local residents and industrial enterprises. In Angola, the development of telecommunications is conventionally divided into two periods: colonial and post-independence. Cellular communication standards have gone through several generations. Each standard has its own characteristics, advantages and disadvantages. At the moment, the most advanced is considered to be fifth-generation cellular communication.

Keywords: communication standards, 5G communication, Internet, connection, users subscribers, Internet of Things.

For citation: Korobova L. A., Kibanga A. F. Organization of fifth generation communication systems in developing countries on the example of the republic of Angola. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 22-27. (In Russ.).

Введение

Ангола представляет собой государство, в котором около 70% населения проживает в прибрежной зоне и в городах, т.е. эти территории считаются густонаселенными. Но чуть более 30% населения являются сельскими жителями. В Анголе в 2023 году зарегистрировано

11 миллионов интернет-пользователей, из которых 3,45 миллиона старше 18 лет, что составляет около 20% взрослого населения. За год использование социальных сетей в Луанде выросло на четверть.

На открытии в Анголе первого форума, посвященного интернет управлению, было

сказано, что 33% от общей численности населения страны доступно использование интернета. Анализ показал значительный рост числа пользователей сотовой и интернет связи, социальных сетей. Тем не менее, несмотря на эти успехи, существуют проблемы, особенно, когда дело касается увеличения сетки широкополосных сетей и других объектов инфраструктуры. Это приводит к стиранию цифрового неравенства между городскими и сельскими районами, и продвижению компьютерной грамотности для всех ангольцев, независимо от зоны проживания и социально-экономических условий. Возможность обеспечения доступа в интернет широкому кругу населения гарантирует, что каждый гражданин имеет навыки, необходимые для использования информационных и коммуникационных технологий. Цель использования навыков направлены на служение и развитие общества.

Сети 5G открывают возможности для внедрения инновационных технологий, как интернет вещей, автономных транспортных средств, дополненной реальности и виртуальной телемедицины и др., которые могут совершить революцию в различных аспектах жизни и бизнеса. Возможности 5G поддерживает большое количество одновременно подключенных устройств и обеспечить низкую латентность, что делает его идеальным для стимулирования развития смарт-городов, повышения эффективности государственных услуг, транспорта, здравоохранения и безопасности в пригородных районах.

Материалы и методы исследования

Прогноз по основным параметрам сети 5G — скорость соединения от 100 Мбит/с до 20 Гбит/с при максимальной нагрузке, время реакции сетевого соединения от 1мс до 10мс. Такие характеристики создают большие предпосылки для использования данного вида связи в различных системах управления, а именно:

- в системах реального времени и дистанционного управления;
- в управлении беспилотными аппаратами;
- в системах, применяющий машинное зрение.

Применение стандарта 5G сети позволяет прогнозировать увеличение числа подключений до миллиона пользователей на каждый кв. км. А через 10 лет будем иметь свыше 40 млрд приборов (гаджетов, компьютеров и др.

комплексов технических средств), запрашиваемых услуги сотовой связи [1].

Динамика увеличения абонентов средствами связи (более 5 млрд пользователей) неуклонно растет во всем мире. Эта же тенденция наблюдается и в республике Ангола. Основные пользователи сотовой связи проживают в густонаселенных районах, особенно в мегаполисах. Сети предыдущего поколения (3G и 4G) уже не справляются или плохо справляются с возлагаемой на них нагрузкой. Нагрузка на сети ежегодно увеличивается и за счет внедрения современных технологий (примерно на 15%), например, за счет интернет вещей. Становится модным и востребованным дистанционное управление бытовыми приборами. Для этого также необходим «хороший» интернет.

Беспилотный транспорт все больше входит в обычную жизнь. Это и летательные аппараты (дроны), и наземный колесный транспорт (аэротакси), и уже известно о прототипах надводного беспилотного транспорта. Дистанционное управление всеми видами беспилотников требует высоко скоростного интернета и беспрепятственного распространения радиоволн со скоростью до 1 мс. Прототипы беспилотного транспорта уже проходят апробацию на городских магистралях и магистралях между городами, например, трасса Петербург - Москва. Применение беспилотного транспорта накладывает и определенные требования к системам с участием операторов и беспилотников. Основные требования - четкая бесперебойная связь, обеспечивающая безопасность пассажиров.

Информационное общество стоит на пороге появления нового поколения сотовой связи. На сегодняшний момент это связь 5G. Кроме решения перечисленных выше проблем беспроводная 5G связь содержит в себе возможность передачи радиоволн на большие расстояния. Передача информации радиоволнами осуществляется посредством антенн с большим радиусом действия. Антенны устанавливаются на специальных вышках. Антенны распространяют сигнал в виде направленного луча, который попадает на устройства провайдера, и далее, к клиентам сотовой связи. Таким образом, обеспечивается и высокоскоростной интернет.

Для обеспечения устойчивого покрытия связью 5G определенной территории требуется расчет количества вышек. При этом необходимо учитывать параметры передачи информации:

расстояние, на которое передается сигнал, рельеф местности (равнина, насаждения, их густота, гористость, водное пространство и т.д.), высота вышек, оборудование (антенны), устанавливаемое на вышке [2]. Требование к антеннам — они должны иметь возможность подстраиваться под требования абонентов, согласно предметной области, т.е. увеличивать или уменьшать радиус действия. Правильное количество вышек и их установка обеспечат передачу сигнала от 1 до 500 км, охват антенны на вышке обеспечат связью от 10 до 1000 абонентов.

5G связь имеет определенный диапазон частот распространения сигнала (дециметровые и сантиметровые волны), способ кодирования (увеличивается скорости передачи данных), чувствительность к препятствиям на пути сигнала (отражение от препятствий), т.е. при использовании 5G связи данные передаются практически без помех.

Безопасность — основное требование к передаче данных при любом виде связи (2G, 3G, 4G). 5G использует четырехуровневую модель безопасности, которая увеличивает безопасность [3]. Перед началом передачи данных требуется подтверждение от оператора связи, поставщика, предоставляющего услуги, местного узла связи, а также устройства абонента.

Большое количество станций и высокая стоимость аппаратных комплексов в сумме приводят к очень высоким затратам при построении сети пятого поколения. Таким образом, расчет геометрических параметров расположения базовых станций последнего поколения является актуальной задачей как с технической, так и с экономической точек зрения [4].

Кроме экономических факторов, которые сводятся к количеству станций, абонентов, объему предоставляемых услуг, необходимо учесть географические особенности и характеристики архитектурных сооружений в зоне обслуживания. В настоящее время не существует общепринятых адекватных методов математического моделирования зон обслуживания базовых станций. Построение сетей ведется эмпирическими методами по мере экономических возможностей.

Таким образом, основной задачей при построении сети сотовой связи является минимизация числа базовых станций наряду с обеспечением связи для определенного числа абонентов и сохранением высокого качества сигнала.

К настоящему времени известен ряд исследований, посвященных решению данной задачи, в которых используются традиционные методы с использованием схемы ветвей и границ, алгоритма PMET-PSO, процедуры Дэвиса-Путнама [5-7]. Однако, в этих работах не учитываются потери при распространении сигнала в радиоканале, характеристики затухания между антеннами базовой станций и абонентской станцией.

Организация сотовой связи начинается с выбора участка, анализа рельефа местности и количества пользователей, определения приблизительных мест расположения базовых станций. Создаваемая сеть должна обеспечить необходимую скорость передачи данных при использовании конкретного вида оборудования. Задача дальнейшего моделирования — свести к минимуму количество станций при сохранении качества связи.

Результаты исследования и их обсуждение

Для построения модели сети применим метод кластеризации. Выделим количество мест A , на которых теоретически возможно расположение базовых станций [8]. Будем считать их координаты известными. Таким образом, возможное количество станций находится в интервале от 1 до $A-1$ и они должны обслуживать B абонентов. Тогда для моделирования конфигурации сети введем несколько характеристик.

Число реальных базовых станций, расположенных, в выделенных для них местах определим как $a = \overline{1, A}$. Для обеспечения работы сети возможно использовать несколько типов станций. Количество типов обозначим $c = \overline{1, C}$, производительность — p_c , Гбит/с, а стоимость каждой станции — q_c . Число присутствующих абонентов может колебаться в пределах $b = \overline{1, B}$, а полоса пропускания для абонента — r_b , Гбит/с. Места расположения базовых станций обозначим радиус-векторами $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_A)$. Тогда распределение абонентов по базовым станциям можно представить в виде матрицы $Q = \| Q_{ba} \|$.

Таким образом, мы определили основные характеристики для моделирования сети связи. Следующим шагом приступим к математическому моделированию сети. Очевидно, что в каждом из возможных мест расположения базовых станций A возможна реализация только двух ситуаций: в данном конкретном месте

может быть установлена только одна станция или в результате оптимизации место окажется свободным. Математически такое положение можно описать следующим выражением:

$$\forall a \sum_{n=1}^N Y_{ac} \leq 1 \quad (1)$$

При этом абонент может быть подключен только к одной станции. Т.е.

$$\forall b \sum_{a=1}^A Q_{ba} = 1 \quad (2)$$

В общем и целом, размещение станции и подключение к ней абонентов можно описать выражением:

$$\forall a \sum_{b=1}^A \sum_{c=1}^C Q_{ba} Y_{ac} \geq 1 \quad (3)$$

Высокое качество связи обусловлено целым рядом параметров технического оборудования как у оператора связи, так и у абонента. Однако, совершенно очевидно, что при любых условиях производительность базовой станции должна быть больше, чем объем передаваемой и принимаемой информации всех абонентов, подключенных к любой станции [9].

Для построения оптимальной конфигурации сети базовых станций необходимо обеспечить выполнение следующих условий: все абоненты должны быть подключены в соответствии с условиями (1) и (2); стоимость подключения, стоимость оборудования должны быть минимальны. Отсюда следует, что функция стоимости этих работ будет иметь вид:

$$S = \sum_{b,a,c} U_{bac} Y_{ac} Q_{ba} + \sum_{a,c} q_c Y_{ac} \quad (4)$$

Фактически получена целевая функция, минимум которой позволит определить оптимальный качественный и количественный состав сети связи, а также ее геофизическое расположение.

При построении сетей 3-G и 4-G можно было игнорировать процессы рассеивания сигнала. Сети пятого поколения используют более короткие волны и, следовательно, в меньшей степени проявляют волновые свойства, т.е. они не огибают препятствия, а отражаются от них и быстрее затухают. Существует много моделей распространения электромагнитных волн различных частот [10]. Однако, для описания распространения высокочастотного сигнала 5-G лучше всего подходит модель SUI.

Модель SUI (англ. Stanford University Interim) основана на серии измерений, проведенных на частоте 1,9 ГГц [11], и справедлива для частотного диапазона вплоть до 3,5 ГГц и расстояния между БС и АС от 100 м до 8 км, высот подвеса антенн БС и АС от 10 до 80 м и от 2 до 10 м соответственно.

В соответствии с этой моделью потери при распространении в городской среде можно вычислить по следующей формуле:

$$L = 20g\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) + 10\gamma g\left(\frac{d}{d_0}\right) + \delta + 6g\left(\frac{f}{200}\right) - 20g(0,5h) \quad (5)$$

где d_0 – базовое расстояние, λ – длина волны; γ – экспонента потерь при распространении сигнала; d – расстояние между базовой и абонентской станциями; $\delta = 8,2 \dots 10,6$ дБ – случайная составляющая потеря при распространении сигнала; f – рабочая частота; h – высота подвеса антенны.

Для учета энергетических потерь при распространении сигнала в сети 5-G введем коэффициент l_{ba} , который будет меняться от 0 до 1. При $l_{ba}=0$ уровень потерь L_{max} будет максимальным, а при $l_{ba}=1$ потери будут минимальны. Коэффициент l_{ba} учитывает геофизические условия передачи сигнала от абонента b к базовой станции, расположенной в месте с координатами m и позволяет правильно с математической точки зрения вычислять минимум функции S :

$$S = \sum_b \sum_a \sum_c U_{bac} Y_{ac} Q_{ba} + \sum_a \sum_c q_c Y_{ac} + \sum_a \sum_b \frac{1}{l_{ba}} \cdot Q_{ba} \rightarrow \min \quad (6)$$

Коэффициент l_{ba} характеризует все значения потерь L , однако величина, обратная l_{ba} всегда равна некоторому целому числу от 1 до ∞ .

Таким образом, формула (6) характеризует стоимость подключения абонентов в данной схеме расположения станций, стоимость самих базовых станций и, наконец, потери в рассматриваемой структуре передачи данных. Минимум функции S будет характеризовать оптимальную конфигурацию сети.

Заключение

Таким образом, в работе представлена математическая модель, позволяющая

рассчитать оптимальные параметры сети сотовой связи пятого поколения. Показано, что для экономически оправданного функционирования сети необходимо учесть стоимость подключения абонента, стоимость базовой станции и потери мощности сигнала связи, которые определяются геометрией сети и геофизическими характеристиками местности.

Стоит отметить, что в данной модели не учитываются колебания сигнала относительно

среднего уровня (медленные замирания), колебания сигнала относительно уровня сигнала, подверженного медленным замираниям (быстрые замирания), а также помехи, связанные с интерференционными явлениями. Однако, перечисленные явления не оказывают серьезного влияния на моделирование сети и поэтому не учтены.

Литература

1. Клименко, Д. А. К вопросу о качестве предоставления связи / Д. А. Клименко, Л. А. Коробова // Стандартизация, управление качеством и обеспечение информационной безопасности в перерабатывающих отраслях АПК и машиностроении, Воронеж, 28 октября 2016 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2016. – С. 25-27.
2. Официал, Т. И. Анализ безопасности и защищенности информационных систем / Т. И. Официал, Л. А. Коробова // Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник материалов VII национальной научно-практической конференции с международным участием, Воронеж, 25–27 декабря 2018 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. – С. 498-505.
3. Ойцева, О. Ю. Особенности распространения мобильной связи в лесной среде / О. Ю. Ойцева, А. И. Коробов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 5-4(16-4). – С. 131-134.
4. Разработка модели оптимизации выбора площадки базовой станции на основе алгоритма PMET-PSO / Т.П. Новикова, Н.В. Панина, Е.А. Аникеев, Ч. Цзяньцун // Моделирование систем и процессов. - 2022. - Т.15, № 4. - С. 61-69.
5. Хаустов, И. А. Применение эвристических алгоритмов в геоинформационных системах распределения базовых станций связи в условиях местности с плотной застройкой / И. А. Хаустов, С. С. Рылев, Р. А. Романов // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. - Курск, 2018. - С. 218-220.
6. Богданец, Е. С. Анализ точности позиционирования базовых станций в зависимости от плотности их расположения / Е. С. Богданец, В. А. Чистогова // Master's Journal. - 2018. - № 2. - С. 36-42.
7. Токарев, И. И. Алгоритм решения оптимизационной задачи выбора базовых станций для систем подвижной связи / И. И. Токарев, С. А. Олейникова // Интеллектуальные информационные системы: Труды Международной научно-практической конференции. - Воронеж, 2019. - С. 81-83.
8. Филиппов, И. Ф. Анализ требований к базовым и абонентским станциям 5G / И. Ф. Филиппов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. - 2020. - № 1-2. - С. 102-103.
9. Прасолов А.А. Анализ применимости и сравнение известных моделей распространения радиоволн с результатами радиоизмерений технологии LoRa / А.А. Прасолов, А.С. Федоров // Экономика и качество связи. – 2024. – №3. – С. 40-56.
10. Channel Models for Fixed Wireless Applications // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.
11. Khan I., Eng T. C., Kamboh S. A. Performance analysis of various path loss models for wireless network in different environments // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 161-165.

References

1. Klimenko, D. A. On the issue of the quality of communication provision / D. A. Klimenko, L. A. Korobova // Standardization, quality management and information security in the processing industries of agriculture and mechanical engineering, Voronezh, October 28, 2016. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2016. pp. 25-27.
2. Official, T. I. Analysis of security and security of information systems / T. I. Official, L. A. Korobova // Modeling of energy information processes: Collection of materials of the VII National Scientific and Practical Conference with international participation, Voronezh, December 25-27, 2018 of the year. Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019, pp. 498-505.

3. Oitseva, O. Y. The peculiarities of the spread of mobile communications in the forest environment / O. Y. Oitseva, A. I. Korobov // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3, No. 5-4(16-4). pp. 131-134.
4. Development of a model for optimizing the choice of a base station site based on the PMET-PSO algorithm / T.P. Novikova, N.V. Panina, E.A. Anikeev, C. Jiancong // Modeling of systems and processes. 2022. Vol. 15, No. 4. pp. 61-69.
5. Khaustov, I. A. Application of heuristic algorithms in geoinformation systems for the distribution of base communication stations in densely populated areas / I. A. Khaustov, S. S. Rylev, R. A. Romanov // Promising development of science, technology and technology: Collection of scientific articles of the 8th International Scientific and Practical Conference. Kursk, 2018. pp. 218-220.
6. Bogdanets, E. S. Analysis of the positioning accuracy of base stations depending on the density of their location / E. S. Bogdanets, V. A. Chistogova // Master's Journal. - 2018. - No. 2. - pp. 36-42.
7. Tokarev, I. I. Algorithm for solving the optimization problem of selecting base stations for mobile communication systems / I. I. Tokarev, S. A. Oleinikova // Intelligent information systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Voronezh, 2019. pp. 81-83.
8. Filippov, I. F. Analysis of requirements for 5G base and subscriber stations / I. F. Filippov // Microwave technology and telecommunication technologies. 2020. No. 1-2. pp. 102-103.
9. Prasolov A.A. Analysis of the applicability and comparison of known radio wave propagation models with the results of radio measurements of LoRa technology / A.A. Prasolov, A.S. Fedorov // Economics and quality of communication. – 2024. – No. 3. – pp. 40-56.
10. Channel Models for Fixed Wireless Applications // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.
11. Khan I., Eng T. C., Kamboh S. A. Performance analysis of various path loss models for wireless network in different environments // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2012. – T. 2. – № 1. – С. 161-165.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Коробова Людмила Анатольевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X
Кибанга Антониу Фамороза	аспирант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", аспирант кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, agufamoroso@gmail.com

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Korobova Lyudmila Anatolyevna	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the department of Information technology, modeling and management, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X
Kibanga Antonio Famososa	graduate student, Voronezh state university of engineering technologies, graduate student of the department of Information technology, modeling and management, agufamoroso@gmail.com

статья поступила в редакцию 02.05.2025	одобрена после рецензирования 15.05.2025	принята к публикации 28.05.2025
the article was submitted 02.05.2025	approved after reviewing 15.05.2025	accepted for publication 28.05.2025

ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В РЕСПУБЛИКЕ АНГОЛА

Максим Николаевич Ивлиев [✉] ¹ max1m@mail.ru
Антониу Фамороза Кибанга ¹ aqufamoroso@gmail.com

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

Аннотация. Статья посвящена анализу развития и становления сотовой связи в республике Ангола. В рамках исследования определена техническая целесообразность внедрения сети нового пятого поколения в провинции Намибе. Предложено провести адаптацию к географическим и демографическим предпочтениям региона. Определено, что на территории республики существует инфокоммуникационная связь различных поколений. В последнее время наибольшее покрытие приходится на связь четвертого поколения, но параллельно с этим прочно развивается и связь пятого поколения. Основная цель работы — оценить инфраструктуру развития телекоммуникаций Намибе и выявить существующие проблемы внедрения связи пятого поколения. Предложено проведение расчета пропускной способности для развертывания сети с учетом топологии, плотности населения и количества пользователей, нуждающихся в подключении. Рассмотрены сельские и городские районы провинции Намибе, а также территории порта и туристические зоны. Работа внесет вклад в инфотелекоммуникационную инженерию региона, сочетающую технический, экономический и социальный анализ. Результаты данного исследования будут возможно перенести на другие провинции республики Ангола или для решения подобных задач в других развивающихся странах.

Ключевые слова: сотовая связь, поколения связи, инфокоммуникация, пользователи, анализ, пропускная способность.

Для цитирования: Ивлиев М. Н., Кибанга А. Ф. Эмпирический подход к построению телекоммуникационных сетей в республике Ангола // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 28-35.

Original article

AN EMPIRICAL APPROACH TO BUILDING TELECOMMUNICATION NETWORKS IN THE REPUBLIC OF ANGOLA

Maxim N. Ivliev [✉] ¹ max1m@mail.ru
Antonio Famosa Kibanga ¹ aqufamoroso@gmail.com

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

Abstract. The article is devoted to the analysis of the development and establishment of cellular communications in the Republic of Angola. The study determined the technical feasibility of introducing a new fifth-generation network in the province of Namibe. It is proposed to adapt to the geographic and demographic preferences of the region. It is determined that on the territory of the republic there is infocommunication communications of various generations. Recently, the greatest coverage falls on the fourth-generation communication, but in parallel with this, the fifth-generation communication is also firmly developing. The main objective of the work is to assess the infrastructure for the development of telecommunications in Namibe and to identify existing problems in the implementation of fifth-generation communication. It is proposed to calculate the bandwidth for network deployment taking into account the topology, population density and the number of users in need of connection. Rural and urban areas of the province of Namibe, as well as port areas and tourist areas are considered. The work will contribute to the infocommunication engineering of the region, combining technical, economic and social analysis. The results of this study can be transferred to other provinces of the Republic of Angola or to solve similar problems in other developing countries.

Keywords: cellular communication, communication generations, infocommunication, users, analysis, bandwidth.

For citation: Ivliev M. N., Kibanga A. F. An empirical approach to building telecommunication networks in the republic of Angola. *Ingeneryne tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 28-35. (In Russ.).

Введение

Вопросу расширения сети 5G в столице Луанде и периферийных районах сегодня в Анголе уделяется большое внимание. Актуальность этого объясняется потенциальным положительным эффектом на состояние

сотовой связи этих зонах. Рост спроса на услуги связи, высокая скорость и низкая задержка, расширение сети 5G для загородных участков приносит значительные выгоды в плане доступа к информации, инноваций и экономического развития.

Настоящее исследование состоит в изучении развертывания сети 5G в пригородных районах, рассматривая проблемы, возможности и последствия, которые связаны с этим переходом для следующего поколения мобильной связи.

Технология 5G может дать толчок в таким странам, как Ангола и в плане технологической инфраструктуры, со слабым промышленным парком, где в основном преобладает ручные процессы и ручное производство. Но внедрение требует инвестиций и времени. Так же существуют и другие препоны, которые объясняются и политикой власти для облегчения сотрудничества между всеми заинтересованными сторонами, ставками в регулировании и снижении барьеров с точки

зрения спектра и инфраструктуры. Преимущества очевидны: 5G можно интегрировать в различные спектры промышленности, что обеспечит рост производительности. Глобальная сеть нового поколения соединит людей и машины, тем самым повысится рентабельность, уровень производственных процессов и энергоэффективность [1, 2]. Это своего рода способ мобилизации бизнеса, с учетом соблюдения безопасности окружающей среды, что позволит избежать экологическую катастрофу.

Процесс развития телекоммуникаций в Анголе разделяется на два периода: колониальный и после установления независимости. Основные даты и их описание приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные этапы становления телекоммуникаций в Анголе

Table 1. Main stages of the development of telecommunications in Angola

I. Колониальный период / I. The colonial period	
Год / Year	Характеристика / Characteristic
1885	Установка двух телефонов и общение с помощью этих телефонов. Опыт был одобрен. Далее были установлены первые 50 аппаратов.
1902	Вступление в силу положения с названием "Правила почтовых сообщений", которое определило реформы и законы кодирования, распространявшиеся на сигналы почты и телеграфов. Положение действовало до 29 ноября 1916 года.
1913	Создание Школы Почты и Телеграфов
1927	Первая Служба Радио трамвай между Луанда и Лиссабон.
1940	Создание Министерства Колоний по регулированию и администрированию средств связи. Оно распространяло свои полномочия на Анголу и Мозамбик. Министерство предоставляло автономия этим государствам для развития средств связи.
1944	Создание СТТУ
1951	Открытие телефонных и телеграфных каналов между Луандой и Лиссабоном.
1952	Создание радиотелеграфных схем по маршрутам Луанда-Киншаса, Луанда-Браззавиль и внедрение услуги радиотелеграфа между Луанда и Лиссабон.
1963	Создание соединений между основными городами Анголы и между ними и внешними территориями, с использованием систем радиосвязи (СР).
1974	Создание станции для спутниковой связи от Сасуасо с оборудованием на 120 телефонных каналов. Объединение 72 организаций для предоставления услуг: возможность передачи и записи телевизионных сигналов.
II. Период после независимости / II. The period after independence	
1975	Создание Государственного Бюро Связи
1976	Присоединение Ангола Международного Союза Электросвязи (МСЭ)
1976	Создание Публичной Компании в области Телекоммуникаций (EPTTEL)
1979	Прохождение попечительского совета по связи для Министерства Транспорта и Коммуникаций (MINTEC)
1980	Раскол в среде телекоммуникаций Анголы
1985	Принятие Закона о телекоммуникациях для наведения порядка в области средств связи
1989	Реализация Национального Института связи (ITEL)
1993	Объединение (слияние) двух компаний ENATEL и EPTTEL. В результате в Анголе появляется первая компании по предоставлению услуг связи АНГОЛА – ТЕЛЕКОМ.
1995	соблюдение RASCOM - Пан-Африканского Спутника Связи
1997	Создание Министерства Почт и Телекоммуникаций
1998	Переход на волоконно – оптический кабель - SAT-3
1999	Создание специальной организации INACOM, являющейся органом телекоммуникационного регулятора страны. Это современный комитет, который прошел реформацию от министерства Почты и Телекоммуникаций до министерства Телекоммуникаций и Информационных Технологий.

Эволюция информационных сетей в Анголе отмечена постепенным процессом инноваций и становления технологий мобильной связи. История мобильных сетей начинается с развития различных поколений (связи G) технологий беспроводной связи. Каждое поколение приносило значительные

улучшения, прокладывая путь к развитию 5G. При этом в Анголе переход от одного поколения к другому всегда был направлен на повышение скорости передачи, емкости сети и эффективности. В таблице 2 представлен процесс эволюции мобильных сетей в Анголе с течением времени.

Таблица 2. Эволюция мобильных сетей 1980 – 2020

Table 2. Evolution of mobile networks 1980 – 2020

Поколение связи / Generation of communication	Период развития / Period of development	Характеристика / Characteristics
Первое поколение (1G)	1980-1990	Аналоговые технологии. Сеть допускала только голосовые вызовы, имела ограничения по пропускной способности и качеству передачи информации.
Второе поколение (2G)	1990-2000	Цифровые технологии. Передача данных таких как текстовые сообщения (СМС) и цифровые голосовые данные. GSM - глобальная система мобильной связи стала одной из преобладающих технологий. Инновации: большая пропускная способность сети, увеличение безопасности и эффективности передачи данных.
Третье поколение (3G)	2000-2010	Поддержка мобильного интернета. Доступ к сети Интернет, электронной почте и видеозвонкам. Одним из основных стандартов был UMTS (универсальная система мобильной связи). Инновации: более высокая скорость передачи данных, облегчающая просмотр веб-страниц и использование более современных мобильных приложений.
Четвертое поколение (4G)	2010-2020	Технология беспроводной высокоскоростной передачи данных. В основе лежит GSM/EDGE сеть. Инновации: увеличение скорости передачи до 1 Гбит/с, возможность потоковой передачи видео в формате 4G и увеличение общего числа подключенных абонентов
Пятое поколение (5G)	Параллельно с продвижением связи 3G и 4G ведется разработка и внедрение связи следующего поколения, так называемой сети 5G. Этому способствовало постоянное увеличение объемов передаваемых данных, количество пользователей и развитие новых современных технологий.	
	2000-2010	Возрастание спроса на сети с высокой пропускной способностью, уменьшение задержки и потерь информации. Это позволяет внедрять новые типы приложений и услуг, таких как дополненная реальность (AR), автономные транспортные средства, Интернет вещей (IoT). 2008 год - начало повсеместного изучения в различных организациях требований и технологий, которые потребуются для будущей сети 5G.
	2012-2-15	Начало активного исследования телекоммуникационными компаниями над развитием технологии 5G. Инновации: скорость загрузки до 20 Гбит/с с задержкой до 1 миллисекунды, обслуживание до 1 миллиона подключенных устройств на 1 км ² .
	2016-2018	Начало производства оборудования и подключение абонентов к сети 5 G, проведение исследовательских работ с обучающими центрами и университетами.
	2019-2020	Распространение сети 5G в крупных городах. Появление первых коммерческих сетей 5G. Пользователи начинают понимать преимущества сети, и прежде всего, высокую скорость предоставления информации.

Основная часть

Внедрение глобальной сети 5G сталкивается с такими проблемами, как необходимость в новой инфраструктуре, доступность частотного спектра и необходимость в большем количестве базовых станций (из-за использования миллиметровых волн). Основными препятствиями для

быстрого внедрения технологий 5G во всем мире являются проблемы нормативного регулирования и высокая стоимость создания инфраструктуры 5G [2]. Основные перспективы внедрения и инновации: частные сети для предприятий, автоматизация, внедрение и поддержка новых разработок и технологий: искусственный интеллект (ИИ) и расширенная реальность (XR). Также ожидается, что с

появлением 5G появятся новые приложения и услуги, что приведет к значительным изменениям в таких секторах, как здравоохранение, транспорт, развлечения, образование и производство. Интернет 5G – это пятое поколение мобильных технологий, за которым следует 4G (LTE). Он разработан для обеспечения высокой и эффективной скорости соединения, с основной возможностью одновременного подключения устройств и меньшей задержкой (временем отклика) по сравнению с интерфейсами.

В пригородных районах являются городских районах, отдаленных, которые делают переход между густонаселенных городских районах и сельской местности [3, 4]. Связь этих областях возникают часто значительные трудности с точки зрения телекоммуникационной инфраструктуры, что может привести к ограниченному доступу к высокоскоростному Интернету и современных услуг связи [5]. В ходе развертывания сетей 5G в этих зонах крайне важно, чтобы исключить этот цифровой разрыв, предоставляя возможности более быстро и надежно для жителей и местных предприятий.

Кроме того, сети 5G открывает возможности для внедрения инновационных технологий, как Интернет, IoT, автономных транспортных средств, дополненная реальность и виртуальная и телемедицина, которые могут совершить революцию в различные аспекты жизни и бизнеса на дачных участках. Возможности 5G поддерживает большое количество одновременно подключенных устройств и обеспечить низкую латентность, что делает его идеальным, чтобы

стимулировать развитие смарт-городов, повышение эффективности государственных услуг, транспорта, здравоохранения и безопасности в пригородных районах.

Методика проведения предпроектного исследования включает в себя практический и междисциплинарный подходы. Первоначально проведен обзор литературы по вопросам существующих подходов к разработке сетей передачи данных. Сбор информации о покрытии сигнала монтируемых сетей структурировался по определенным категориям [6, 7]. В зависимости от густонаселенности районов и инфраструктуры: в условиях городов (малые города, столичные или города, с большим количеством туристов), в условиях близкой и отдаленной провинции. В зависимости от географического положения: наличие растительности, близость к водной поверхности, пустыня. Данные исследования были направлены на то, чтобы понять и дать обоснование особенностям развертывания сети 5G в подобных условиях, учесть риски и понять ожидаемые проблемы. Механизм проведения исследования должен учитывать основные особенности процесса распространения сигнала. Также необходимо определить приоритетные области, где использование сети пятого поколения необходимо первоначально и где действительно важно использование основных преимуществ такого вида связи [8].

Развертывание сети пятого поколения включает в себя ряд технических компонентов и этапов разработки, которые позволят операторам связи предоставить необходимую инфраструктуру. Процесс можно разделить на функциональные этапы (таблица 3).

Таблица 3. Поэтапный процесс развертывания сети

Table 3. Step-by-step network deployment process

Этап 1 / Stage 1	Этап 2 / Stage 2	Этап 3 / Stage 3
Определение структуры сети и основных диапазонов частот	Определение числа базовых передающих станций	Анализ требований, предъявляемых к сети
Основные задачи: - диапазон частот и скорость передачи информации; - мощность используемых станций и их радиус действий.	Основные задачи: - число станций и количество абонентов; - технологии и станции четвертого поколения или пятого поколения.	Основные задачи: - управление используемым оборудованием; - эффективность используемого программного обеспечения; - предоставление услуг требуемого качества.

Для реализации развертывания распределенной сети необходимо подобрать оборудование, поддерживающее соответствующие стандарты: это устройство предоставления доступа к информации, и антенна, которая позво-

лит передавать и принимать информацию. Класс выбранной антенны должен соответствовать используемой в 5G технологии, так называемая технология «множественный вход и множественный выход». Большое значение

имеет выбор места установки передающей антенны, которая обеспечит устойчивую зону охвата. Очевидным является, что необходимо определение оптимального количества антенн, как передающих, так и принимающих. Их количество должно позволить предоставлять информацию конечным пользователям или устройства с повышенным уровнем безопасности и с минимальной задержкой сигнала. Распределенная сеть должен обеспечить возможность коммуникации необходимого количества пользователей и устойчивое покрытие всех устройств, находящихся в этой сети. Поэтому для разработки проекта и расчета рационального использования основных компонентов сети необходимы точные данные о зоне, площади и сложности конфигурации покрытия [9].

Разработка и внедрение любого проекта предполагает наличие определенных проблем и рисков.

Финансовые риски. Прежде всего, это оценка стоимости предоставления услуг, которая складывается из множества составляющих. Внедрение 5G требует крупных инвестиций в инфраструктуру, особенно в густонаселенных районах, где требуется большое количество вышек.

Риски приобретения частот пропускания распространения сигнала. Если в густонаселенных районах рынок предоставления услуг уже перенасыщен сетями связи предыдущих поколений (3G или 4G), а связь 5G востребована, то для нее приобретение частот будет стоить дорого. Это повлечет за собой и увеличение стоимости услуг по ее предоставлению.

Политические риски, связанные с координацией действий правительства и операторов предоставления услуг. Данный вид

рисков имеет решающее значение для обеспечения эффективного развертывания 5G, которое не обходится без проблем фрагментации или перегрузки сетей.

Риски технического характера, а именно установка новых технологий, таких как массивные роутеры и антенны миллиметрового диапазона, т.е. требуется значительная модернизация существующих систем.

Преодоление всех перечисленных рисков позволит при внедрении сети пятого поколения сделать огромный скачок в будущее для развивающихся стран. Основным провайдером предоставления инфотелекоммуникационных услуг в республике Ангола является компания Africell. Компания полностью соответствует требованиям, предъявляемым к компаниям такого функционала. Главное требование — наличие лицензии. Услугами сотовой компании Africell пользуются более 15 миллионов абонентов. Радиус действия распространения телефонного сигнала и устойчивого интернета соответствует оптимальному покрытию. Например, для расчета пропускной способности сети можно использовать формулу Шеннона [10]. Основные параметры: пропускная способность отдельного канала связи, полоса пропускания и соотношение полезный сигнал/шум. В качестве примера используем следующие данные: полоса пропускания одного канала для сети пятого поколения 100 МГц, полезный сигнал 20дБ. Тогда пропускную способность сети получим в размере 665Мбит/с. Проведя расчет на реальных данных для географического охвата некоторых районов республики получим численные значения, представленные в таблице 4.

Таблица 4. Анализ производительности сети

Table 4. Network performance analysis

Диапазон частот / Frequency range	Полоса пропускания / Bandwidth		Точка доступа в районах провинции Намибе / Access point in areas of the province of Namibe	Пропускная способность / Throughput capacity $C=B \cdot \log_2(1+NS)$
	Длина волны / Wavelength	Численное значение / Numerical value		
700 МГц	длинные	10 - 20 МГц	Сельские территории	16,6 – 17 Гбит/с
3,5 ГГц	средние	100 МГц	Городская территория	93 Гбит/с
26 ГГц	короткие	400 МГц	Порт, туристические центры	743 Гбит/с

Выводы

Математические расчеты показали, что внедрение связи пятого поколения позволит значительно увеличить пропускную способность сети в различных районах Республики, что позволит привлекать в провинции инве-

стиции [11]. Инвестиции в свою очередь приведут к развитию новых бизнес-моделей и видов бизнеса [12], таких как интернет вещей (IoT), беспилотного транспорта, интеллектуального сельского хозяйства, дистанционного обучения, здравоохранения и т.д.

Технология связи нового поколения влечет за собой и внедрение для передачи информации современных линий связи — оптоволоконно и беспроводных линий. Опять, все зависит от географического местоположения абонентов [13].

В таблице 4 рассмотрено состояние производительности сети провинции Намибе [10, 11]. Но услуга предоставления устойчивой связи распространяется только на три провинции республики, столицы этих провинций Намибе, Хуила и Конене, столица республики Луанда и еще в определенных районах, имеющих исключительные права пользования услугами связи.

Связь нового поколения представляет собой огромный шаг вперед по сравнению с предыдущими поколениями мобильных сетей, обеспечивая гораздо более высокую скорость,

меньшую задержку и большую емкость для подключенных устройств. Его история отражает процесс технологической эволюции, который начался с аналоговой связи в сетях 1G и завершился созданием глобальной связанной инфраструктуры, способной удовлетворить потребности цифрового будущего. 5G уже меняет способ взаимодействия людей и предприятий с технологиями, и его внедрение продолжит преобразовывать мир еще долгие годы.

Хотя первоначальная стоимость внедрения сети пятого поколения высока, особенно с точки зрения инфраструктуры и оборудования, долгосрочные преимущества включают эксплуатационную эффективность, снижение затрат на подключение, повышение производительности функционирования кроссплатформенных приложений.

Литература

1. Клименко, Д. А. К вопросу о качестве предоставления связи / Д. А. Клименко, Л. А. Коробова // Стандартизация, управление качеством и обеспечение информационной безопасности в перерабатывающих отраслях АПК и машиностроении, Воронеж – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2016. – С. 25-27.
2. Офиснал, Т. И. Анализ безопасности и защищенности информационных систем / Т. И. Офиснал, Л. А. Коробова // Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник материалов VII национальной научно-практической конференции с международным участием – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. – С. 498-505.
3. Ойцева, О. Ю. Особенности распространения мобильной связи в лесной среде / О. Ю. Ойцева, А. И. Коробов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 5-4(16-4). – С. 131-134.
4. Разработка модели оптимизации выбора площадки базовой станции на основе алгоритма PMET-PSO / Т.П. Новикова, Н.В. Панина, Е.А. Аникеев, Ч. Цзяньцун // Моделирование систем и процессов. - 2022. - Т.15, № 4. - С. 61-69.
5. Хаустов, И. А. Применение эвристических алгоритмов в геоинформационных системах распределения базовых станций связи в условиях местности с плотной застройкой / И. А. Хаустов, С. С. Рылев, Р. А. Романов // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Сборник научных статей 8-й Международной научно-практической конференции. - Курск, 2018. - С. 218-220.
6. Богданец, Е. С. Анализ точности позиционирования базовых станций в зависимости от плотности их расположения / Е. С. Богданец, В. А. Чистогова // Master's Journal. - 2018. - № 2. - С. 36-42.
7. Токарев, И. И. Алгоритм решения оптимизационной задачи выбора базовых станций для систем подвижной связи / И. И. Токарев, С. А. Олейникова // Интеллектуальные информационные системы: Труды Международной научно-практической конференции. - Воронеж, 2019. - С. 81-83.
8. Филиппов, И. Ф. Анализ требований к базовым и абонентским станциям 5G / И. Ф. Филиппов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. - 2020. - № 1-2. - С. 102-103.
9. Прасолов, А. А. Анализ применимости и сравнение известных моделей распространения радиоволн с результатами радиоизмерений технологии LoRa / А.А. Прасолов, А.С. Федоров // Экономика и качество связи. – 2024. – №3. – С. 40-56.
10. Рылева, Д. А. Разработка детерминированной модели учета потерь сигнала при расчете сетей беспроводной связи / Д. А. Рылева, Л. А. Коробова // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2019. – № 2(16). – С. 39-40.
11. Клименко, Д. А. Алгоритм определения расположения точек беспроводной связи на местности / Д. А. Клименко, Л. А. Коробова // Моделирование энергоинформационных процессов: Сборник

материалов IV и V Международных научно-практических интернет - конференций – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2017. – С. 205-207.

12. Channel Models for Fixed Wireless Applications // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.

13. Khan I., Eng T. C., Kamboh S. A. Performance analysis of various path loss models for wireless network in different environments // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 161-165.

References

1. Klimenko, D. A. On the issue of the quality of communication provision / D. A. Klimenko, L. A. Korobova // Standardization, quality management and information security in the processing industries of agriculture and mechanical engineering, Voronezh – Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2016. – pp. 25-27.

2. Official, T. I. Analysis security and security of information systems / T. I. Official, L. A. Korobova // Modeling of energy information processes: Collection of materials of the VII National Scientific and practical conference with international participation - Voronezh: Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019. - pp. 498-505.

3. Oitseva, O. Y. Features of the spread of mobile communications in the forest environment / O. Y. Oitseva, A. I. Korobov // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. - 2015. – Vol. 3, No. 5-4(16-4). – pp. 131-134.

4. Development of a model for optimizing the selection of a base station site based on the PMET-PSO algorithm / T.P. Novikova, N.V. Panina, E.A. Anikeev, and C. Jianzun // Modeling of Systems and Processes. - 2022. - Vol. 15, No. 4. - Pp. 61-69.

5. Khaustov, I. A. Application of Heuristic Algorithms in Geoinformation Systems for Distribution of Communication Base Stations in Areas with Dense Development / I. A. Khaustov, S. S. Rylev, and R. A. Romanov // Prospective Development of Science, Engineering, and Technologies: Collection of Scientific Articles from the 8th International Scientific and Practical Conference. - Kursk, 2018. - Pp. 218-220.

6. Bogdanets, E. S. Analysis of the Positioning Accuracy of Base Stations Depending on Their Density / E. S. Bogdanets, V. A. Chistogova // Master's Journal. - 2018. - No. 2. - Pp. 36-42.

7. Tokarev, I. I. Algorithm for solving the optimization problem of selecting base stations for mobile communication systems / I. I. Tokarev, S. A. Oleinikova // Intelligent information systems: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Voronezh, 2019. pp. 81-83.

8. Filippov, I. F. Analysis of requirements for 5G base and subscriber stations / I. F. Filippov // Microwave technology and telecommunication technologies. 2020. No. 1-2. pp. 102-103.

9. Prasolov, A. A. An analysis of the applicability and comparison of known radio wave propagation models with the results of radio measurements of LoRa technology / A.A. Prasolov, A.S. Fedorov // Economics and quality of communication. – 2024. – No. 3. – pp. 40-56.

10. Ryleva, D. A. Development of a deterministic model for accounting for signal losses in the calculation of wireless communication networks / D. A. Ryleva, L. A. Korobova // Information technologies in construction, social and economic systems. – 2019. – № 2(16). – Pp. 39-40.

11. Klimenko, D. A. Algorithm for determining the location of wireless communication points on the ground / D. A. Klimenko, L. A. Korobova // Modeling of energy information processes: Collection of materials of the IV and V International scientific and practical Internet conferences – Voronezh: Voronezh State University Engineering Technologies, 2017. – pp. 205-207.

12. Channel Models for Fixed Wireless Applications // IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.

13. Khan I., Eng T. C., Kamboh S. A. Performance analysis of various path loss models for wireless network in different environments // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2012. – Т. 2. – № 1. – С. 161-165.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Ивлиев Максим Николаевич	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, max1m@mail.ru SPIN-код: 5087-7848 ORCID: 0000-0002-8754-2608
Кибанга Антониу Фамороза	аспирант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", аспирант кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, agufamoroso@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)
Ivliev Maxim Nikolaevich	PhD, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, associate professor of the department of Information technology, modeling and management, max1m@mail.ru SPIN-code: 5087-7848 ORCID: 0000-0002-8754-2608
Kibanga Antonio Famorosa	graduate student, Voronezh state university of engineering technologies, graduate student of the department of Information technology, modeling and management, agufamoroso@gmail.com

статья поступила в редакцию 02.06.2025	одобрена после рецензирования 16.06.2025	принята к публикации 24.06.2025
the article was submitted 02.06.2025	approved after reviewing 16.06.2025	accepted for publication 24.06.2025

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Сергей Евгеньевич Симонов s.e.simonov@mtuci.ru

Московский технический университет связи и информатики, улица Авиамоторная, 8А, г. Москва, 111024, Россия

Аннотация. Представлена математическая модель электродвигателя, описывающая основные уравнения вращения, такие как: уравнение электромагнитного крутящего момента и механического крутящего момента, созданная в среде MATLAB Simulink. Для анализа работы реального электродвигателя, математическая модель предусматривает его паспортные характеристики и режимы работы. На данной модели предусматривается моделирование неисправностей, связанных с вибрацией. А также анализ этих неисправностей инструментами MATLAB.

Ключевые слова: математическое моделирование, электродвигатель, MATLAB Simulink, быстрое преобразование Фурье, электромагнитный момент, механический момент.

Для цитирования: Симонов С. Е. Цифровая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 36-46.

Original article

SIMULATION MODEL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Sergey E. Simonov s.e.simonov@mtuci.ru

Moscow technical university of communications and informatics, 8A, Aviamotornaya Street, Moscow, 111024, Russia

Abstract. A mathematical model of an electric motor is presented, describing the main rotational equations, such as the electromagnetic torque equation and the mechanical torque equation, developed in the MATLAB Simulink environment. To analyze the operation of a real electric motor, the mathematical model incorporates its nominal characteristics and operating conditions. The model allows for the simulation of faults related to vibration and the analysis of these faults using MATLAB tools

Keywords: mathematical modeling, electric motor, MATLAB Simulink, Fast Fourier Transform, electromagnetic torque, mechanical torque

For citation: Simonov S. E. Simulation model of a permanent magnet synchronous motor. *Ingenerye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 36-46. (In Russ.).

Введение

Современное промышленное производство предъявляет всё более жёсткие требования к надёжности, энергоэффективности и предсказуемости работы электрических приводов. Одной из ключевых тенденций в области цифровизации промышленных систем является создание математических моделей, способных адекватно описывать динамику и поведение электрических машин в различных режимах. В этом контексте особый интерес представляет моделирование синхронных электродвигателей с постоянными магнитами (СДПМ), которые обладают высоким коэффициентом полезного действия, компактностью и стабильностью работы при изменяющихся нагрузках.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами широко применяются в прецизионных приводах, системах автоматизации, а

также в электромобилях и робототехнике. Однако для обеспечения их надёжной и безопасной эксплуатации необходимы инструменты, позволяющие не только моделировать нормальные режимы работы, но и прогнозировать потенциальные неисправности, включая механические повреждения и вибрационные аномалии.

Целью данной работы является разработка цифровой математической модели СДПМ, реализованной в программной среде MATLAB Simulink. Разработанная модель описывает электромагнитные и механические процессы в электродвигателе на основе уравнений крутящего момента и уравнений электрического контура, с учётом заводских характеристик конкретного двигателя. Кроме того, в модели предусмотрена возможность имитации вибрационных неисправностей и их последующего анализа с использованием методов

спектрального анализа, включая быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Представленная модель может быть использована как для исследовательских целей, так и в составе предиктивных систем технического обслуживания, где на основе анализа отклонений от идеального поведения прогнозируются потенциальные отказы.

Материалы и методы

Для построения модели использован электродвигатель серии ДВУ5М215, модификация 215S. Паспортные параметры, включенные в модель: сопротивление статора (1,05 Ом), индуктивность фаз (53 мГн), магнитный поток (212 мВб), момент инерции ротора (90 кг·см²), крутящий момент (24 Нм).

Для реализации математической модели применялись: MATLAB R2014a, Simulink - встроенная среда моделирования динамических систем.

Анализ результатов проводился с помощью блока FFT Analyzer из пакета powergui (SimPowerSystems), позволяющего проводить быстрое преобразование Фурье на выбранных временных интервалах.

Требования к разработке математической модели

На основе анализа существующих моделей электродвигателей, проведенных в работах [1,2,3] сформированы следующие требования к математической модели.

Универсальная модель электродвигателя должна базироваться на таком математическом описании, которое обобщает динамику разных машин при соответствующей настройке параметров. Известно, что трехфазные машины переменного тока (синхронные и асинхронные) могут быть описаны единообразно в двухосных координатах d-q, связанных с вращающимся полем. В теории электрических машин такая форма записи называется *обобщенными уравнениями машины*, или уравнениями Парка-Кларка. Суть метода состоит в переходе от фазных переменных статора и ротора к обобщенным переменным в вращающейся системе координат, связанной либо с ротором, либо с синхронно вращающимся полем. Благодаря этому уравнения электрического состояния приобретают схожий вид для синхронных и асинхронных машин, различаясь лишь значениями параметров и наличием/отсутствием членов, отвечающих за возбуждение ротора [4].

Общая структура модели: предлагаемый универсальный подход предполагает следующую структуру. На вход модели подаются управляющие воздействия – например, напряжения на статорных обмотках (трехфазные для АС машин или постоянное напряжение для ДС машин). Во внутренних переменных модель учитывает токи фаз (или токи d-q), магнитные потокоцепления, угловую скорость и положение ротора. На выходе могут анализироваться такие величины, как электромагнитный момент, токи, скорости, которые затем используются для оценки состояния двигателя. Ключевая особенность – параметрическая адаптация модели: единый набор дифференциальных уравнений содержит коэффициенты (параметры), которые выбираются в соответствии с конкретным типом двигателя. Таким образом, модель можно рассматривать как базовый шаблон, который специализируется под конкретную машину.

Применение единой структуры выгодно не только унификацией, но и возможностью анализа гибридных систем. Например, в сетях с возобновляемыми источниками энергии можно одновременно моделировать синхронный генератор и асинхронный мотор в едином цифровом пространстве, что облегчает исследование взаимодействия между ними. Универсальная модель служит основой для разработки универсальных алгоритмов управления, поскольку все объекты описаны схожими уравнениями. Кроме того, единый подход упрощает реализацию цифровых двойников, охватывающих парк разнородных электромашин.

Результаты

В данной математической модели возьмем основные параметры электродвигателя ДВУ5М215, а именно:

- сопротивление статора (R_s);
- индуктивность фаз (L_d и L_q);
- момент нагрузки (p);
- крутящий момент (B);
- момент инерции (J);
- магнитный поток ($p(m)$).

Обычно, математические модели строятся на основе дифференциальных уравнений, получая возможность максимально точно описать или охарактеризовать состояние процесса в любой момент времени и в любой выбранной точке в пространстве.

Работа такого электродвигателя описывается следующей системой дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{\phi(t)}}{dt} &= U_{\phi(t)} \cdot \left(\frac{1}{K_{\phi}} \right) + \Omega_{g(t)} \cdot \left(-\frac{K_{\Omega}}{K_{\phi}} \right) + i_{\phi(t)} \cdot \left(-\frac{R_{\phi}}{K_{\phi}} \right) \\ M_g(t) &= i_{\phi(t)} \cdot (K_{nm}) + M_e(t) \cdot (-1) \\ \frac{d\Omega_{g(t)}}{dt} &= M_g(t) \cdot \left(\frac{1}{I_g} \right) \end{aligned} \tag{1}$$

где $U_{\phi(t)}, i_{\phi(t)}$ - соответственно напряжение и ток в фазной обмотке;

$R_{\phi}, K_{\phi}, R_{\phi}, K_{\phi}$ - соответственно активное сопротивление и индуктивность в фазной обмотке;

K_{Ω}, K_{nm} - коэффициент противо - ЭДС и коэффициент передачи по моменту;

I_g - момент инерции ротора;

$M_g(t), \Omega_g(t)$ - $M_g(t), \Omega_g(t)$ - соответственно момент, развиваемый ЭД и скорость на валу;

M_e, M_e - момент сопротивления.

При построении математической модели трёхфазного асинхронного двигателя, как правило, используют не мгновенные значения токов и напряжений в фазах, а переходят к представлению в ортогональных системах координат, вращающихся с определённой угловой скоростью [7-9]. Такой подход позволяет упростить анализ процессов и сделать синтез систем управления более наглядным и удобным для реализации. Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику асинхронного двигателя, имеет следующий вид [11]:

$$\begin{aligned} \frac{di_{xy}(t)}{dt} &= i_{xy}(t) \frac{R_s + R_r \frac{L_M}{L_s}}{L_r - \frac{L_M^2}{L_s}} - i_{xy}(t) \cdot \omega_k(t) + \\ &+ \psi_{xy}(t) \frac{R_s \frac{L_M}{L_s}}{L_s(L_s - \frac{L_M^2}{L_s})} - \psi_{xy}(t) \frac{\omega_k(t) \frac{L_M}{L_s}}{L_s - \frac{L_M^2}{L_s}} + U_{xy}(t) \frac{1}{L_s - \frac{L_M^2}{L_s}}; \\ \frac{di_{yx}(t)}{dt} &= i_{yx}(t) \frac{R_s + R_r \frac{L_M}{L_s}}{L_r - \frac{L_M^2}{L_s}} - i_{yx}(t) \cdot \omega_k(t) + \\ &+ \psi_{yx}(t) \frac{R_r \frac{L_M}{L_s}}{L_r(L_s - \frac{L_M^2}{L_s})} - \psi_{yx}(t) \frac{\omega_k(t) \frac{L_M}{L_s}}{L_s - \frac{L_M^2}{L_s}} + U_{yx}(t) \frac{1}{L_s - \frac{L_M^2}{L_s}}; \\ \frac{d\omega_{xy}(t)}{dt} &= -\psi_{xy}(t) \frac{R_s}{L_s} + i_{xy}(t) \frac{R_s}{L_s} L_M - \psi_{yx}(t) [\omega_k(t) - \Omega_r(t)] \\ \frac{d\omega_{yx}(t)}{dt} &= -\psi_{yx}(t) \frac{R_s}{L_s} + i_{yx}(t) \frac{R_s}{L_s} L_M - \psi_{xy}(t) [\omega_k(t) - \Omega_r(t)] \\ M_d(t) &= \frac{3}{2} Z [\psi_{xy}(t) \cdot i_{yx}(t) - \psi_{yx}(t) \cdot i_{xy}(t)] = M_d(t) + \frac{J}{z} \frac{d\Omega_d(t)}{dt} \\ \Psi_{zx}(t) \cdot \frac{R_z}{L_z} + i_{sy}(t) \cdot \frac{R_z}{L_z} \cdot M_d(t) &= \\ &= \frac{3}{2} Z * [\Psi_{zy}(t) * i_{sx}(t) - \Psi_{zy}(t) * i_{sy}(t)] * \\ &* M_d(t) + \frac{J}{Z} \frac{d\Omega_d(t)}{dt} \\ \Psi_{zx}(t) \cdot \frac{R_z}{L_z} + i_{sy}(t) \cdot \frac{R_z}{L_z} \cdot M_d(t) &= \\ &= \frac{3}{2} Z * [\Psi_{zy}(t) * i_{sx}(t) - \Psi_{zy}(t) * i_{sy}(t)] * \\ &* M_d(t) + \frac{J}{Z} \frac{d\Omega_d(t)}{dt} \end{aligned} \tag{2}$$

где $U_{sx}(t), U_{sy}(t), i_{sy}(t), i_{sx}(t), \Psi_{zy}(t), \Psi_{zx}(t)$ - соответственно проекции векторов напряжения, тока статора и потокосцепления ротора на оси координат X и Y;

Z - число пар полюсов;

R_r, L_r, R_r, L_r - соответственно активное сопротивление и индуктивность ротора;

L_M, L_M - взаимная индуктивность главного потока;

$\Omega_p(t)$ - частота вращения вала АД;

R_s, L_s, R_s, L_s - соответственно активное сопротивление и индуктивность статора.

При управлении асинхронным электродвигателем с постоянным потокосцеплением ротора с использованием трех контуров тока имеем уравнения [11]:

$$\begin{aligned} \psi_{\sigma r}(t) &= \psi_{\sigma r0} = const, \psi_{\sigma s}(t) = 0, \\ i_{sx} &= -\frac{L_m}{R_r \cdot L_r} \cdot \psi_{\sigma r0} \cdot [\omega_k(t) - \Omega_D(t)] \\ i_{sy}(t) &= \frac{1}{L_m} \cdot \psi_{\sigma r0} \cdot M_D(t) = \frac{3}{2} Z \cdot \frac{1}{R^2} \cdot \\ &\cdot \psi_{\sigma r0}^2 \cdot [\omega_k(t) - \Omega_D(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

Моделирование с использованием программного продукта MatLab+Simulink

Скорость вращения создаваемого магнитного поля N_s называется синхронной скоростью, и вычисляется на основе частоты питающей сети и числа пар полюсов электродвигателя:

$$N_s = \frac{f_i \cdot 120}{p} \quad (5)$$

где f_i - частота сети, а p - число полюсов.

Следовательно, после установления частоты питания f_i , и числа полюсов, скорость вращения магнитного поля становится фиксированной и может рассматриваться как постоянная характеристика моделируемого электродвигателя.

В данной работе не используется данный способ, так как в среде Matlab реализацию вращения возможно задавать с помощью компонента Sine Wave. Этот блок выводит синусоидальный сигнал по заданным параметрам. В данном случае, чтобы получить постоянный ток необходимо задать три

синусоидальных сигнала, имитируя сеть трехфазного переменного тока, с заданными параметрами частоты, амплитуды и фазы на вход для блока «Преобразование Парка-Кларка».

Таким образом, при заданной частоте и фиксированном числе полюсов синхронная скорость становится постоянной величиной и может быть использована как характеристика электродвигателя в процессе моделирования.

В рамках данной работы классический расчёт N_s использоваться не будет. Вместо этого вращение магнитного поля реализуется с применением блока Sine Wave в среде MATLAB. Этот элемент позволяет формировать синусоидальные сигналы с заданными параметрами частоты, амплитуды и фазы. Для воспроизведения трёхфазной системы питания моделируются три синусоидальных сигнала, которые подаются на вход блока преобразование Парка-Кларка, обеспечивая преобразование в постоянные компоненты в dq-системе координат.

Преобразование Парка-Кларка - это математическое преобразование, используемое в теории управления и электротехнике для преобразования переменных, описывающих систему переменного тока, из трехфазной системы координат в двухфазную стационарную систему координат. Преобразование Парка-Кларка позволяет удобно описывать и управлять переменными вращающейся системы.

Координатные преобразования, такие как преобразование Кларка и преобразование Парка, широко применяются в системах векторного управления трёхфазными электрическими машинами переменного тока. Преобразование Кларка позволяет перейти от трёхфазных временных сигналов к двум компонентам в неподвижной ортогональной системе координат. Далее преобразование Парка переводит эти компоненты в вращающуюся систему координат, синхронизированную с магнитным полем. Последовательное применение этих преобразований существенно упрощает математическое описание, позволяя заменить переменные синусоидального характера на эквивалентные постоянные величины, что облегчает анализ и управление машиной.

Для синхронных электродвигателей с постоянными магнитами, преобразование Парка-Кларка будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{2}{3} \left(v_a \cos\theta + v_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + v_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ v_q &= \frac{2}{3} \left(-v_a \cos\theta + v_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + v_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \end{aligned} \tag{6}$$

Для наглядности, опишем это так, что на вход поступает три фазы переменного тока – v_a, v_b, v_c , а также параметр θ (угловая скорость). Далее используя тригонометрические вычисления, получаем две фазы постоянного тока – v_d и v_q .

Описание электрического уравнения (относящегося к ротору).

Поскольку трёхфазная система преобразуется в двухфазную, необходимо задать расчёт токов для каждой из фаз. Обобщённая форма электрического уравнения для фазной обмотки в физико-математическом выражении может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} (v_d + L_d \omega_e i_q - R_s i_d) \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} (v_q - R_s i_q - L_d \omega_e i_d - \varphi_m \omega_e) \end{aligned} \tag{7}$$

где i_d, i_q – это сила тока по каждой фазе; L_d, L_q – индуктивность по каждой фазе; R_s – сопротивление статора; ω – угловая скорость; v_d, v_q – напряжение по каждой фазе; φ – величина магнитного потока.

В среде Simulink данное уравнение реализуется с использованием блочной схемы (см. рисунок 1). Параметры индуктивности (L_d, L_q) и магнитного потока φ_m задаются как постоянные значения на основе паспортных характеристик конкретного электродвигателя. Сопротивление R_s также считается фиксированным и включается в модель как коэффициент. Напряжение v_d, v_q и угловая скорость ω_e являются динамическими входными величинами, которые изменяются в процессе моделирования.

Результатом вычислений являются значения токов в фазах, которые затем передаются на вход блока расчёта электромагнитного крутящего момента.

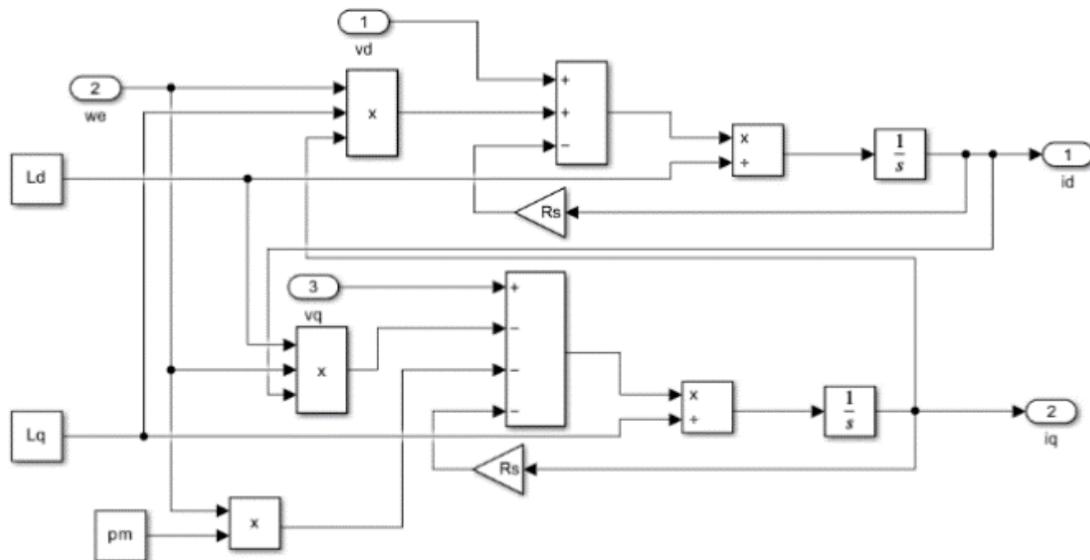


Рисунок 1. Реализация электрического уравнения электродвигателя в среде Matlab Simulink

Figure 1. Implementation of the electric equation of an electric motor in the Matlab Simulink environment

Описание уравнения электромагнитного крутящего момента.

Определение электромагнитного крутящего момента – это крутящий момент, создаваемый вследствие взаимодействия магнитных полей, создаваемых токами катушек, перемещающиеся относительно друг друга и описывается уравнением:

$$T_e = \frac{3}{4} P ((L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_m i_q) \tag{8}$$

Как видно из схемы на рисунке 2, токи в фазах d и q являются динамическими переменными и определяются в процессе моделирования, в отличие от магнитного потока φ_m , который задаётся как постоянная величина.

Индуктивности по осям d и q заданы с учётом их разности, что соответствует математической форме выражения электромагнитного крутящего момента. При этом нагрузочный

момент моделируется как постоянная величина, с некоторым упрощением по сравнению с полной формой исходного уравнения.

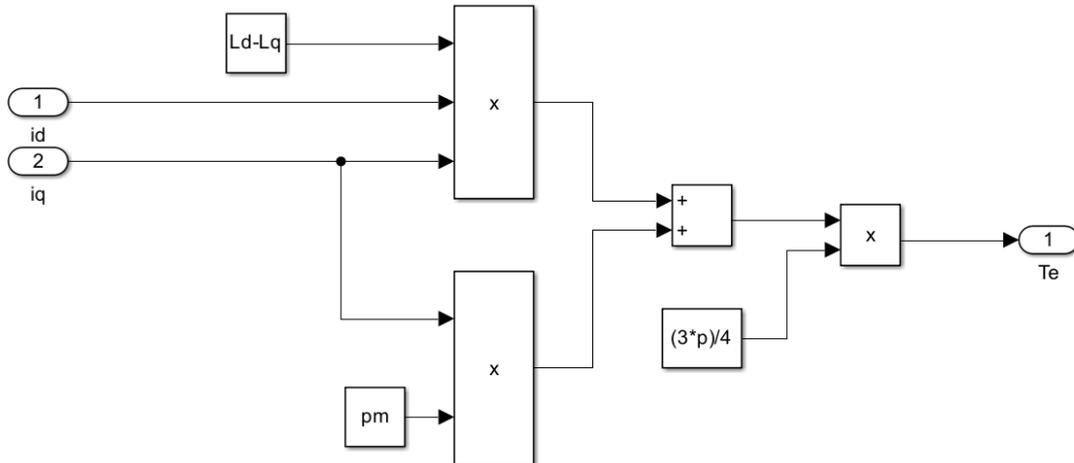


Рисунок 2. Реализация электромагнитного крутящего момента электродвигателя в среде Matlab Simulink

Figure 2. Implementation of the electromagnetic torque of an electric motor in the Matlab Simulink environment

Уравнение механического крутящего момента имеет следующий вид [12]:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_l - b\omega_m) \quad (9)$$

где ω_m – количество оборотов электродвигателя; J – момент инерции; T_e – значения электромагнитного крутящего момента; T_l – некоторая конструктивная постоянная; b – крутящий момент.

T_l , J и b являются постоянными величинами, полученными из паспорта выбранного электромотора. T_e – это рассчитанная в прошлом блоке/уравнении электромагнитный крутящий момент,

являющийся динамически изменяющейся переменной.

В результате последовательного применения преобразований Кларка и Парка, а также решения системы трёх основных уравнений модели, на выходе формируется значение угловой скорости электродвигателя в радианах в секунду. Полученное значение ω_m далее используется в блоках электрического уравнения и преобразования Парка, где оно, умноженное на половину электромеханической постоянной времени, интегрируется для определения текущего угла поворота ротора θ . Этот процесс обеспечивает замкнутый цикл моделирования работы синхронного электродвигателя с постоянными магнитами (см. рисунок 3).

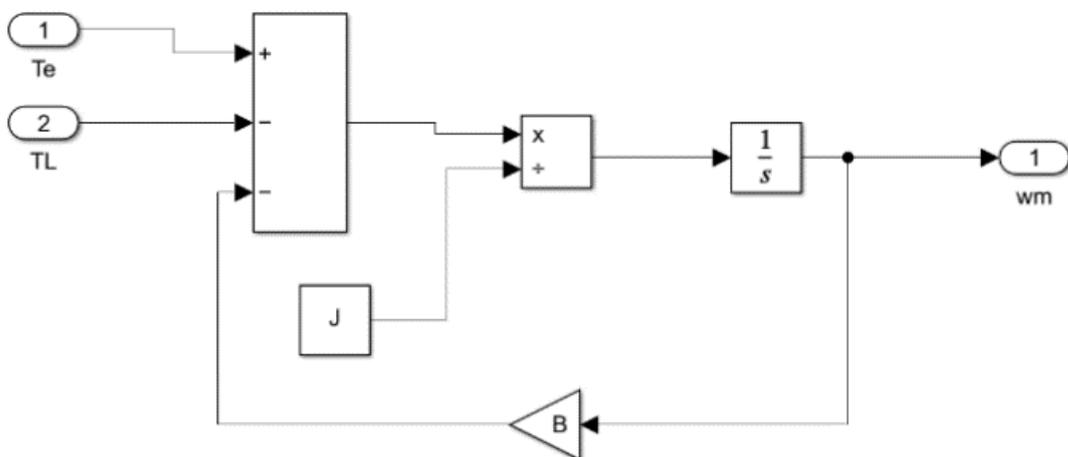


Рисунок 3. Реализация механического крутящего момента электродвигателя в среде Matlab Simulink

Figure 3. Implementation of the mechanical torque of an electric motor in the Matlab Simulink environment

Добавим блоки расчет мощности электродвигателя для каждой из фаз.

Вычислив значение мощности по каждой фазе, можно просуммировать их для получения общей мощности электромотора.

Эксперименты с математической моделью. Теперь зададим в математической модели параметры реального электродвигателя ДВУ5М215, параметры которого приведены выше, чтобы увидеть ее работоспособность и снять показания через блоки Scope.

Блок Scope в Simulink предназначен для построения графиков сигналов функции времени, а также для наблюдения за изменениями сигналов в процессе моделирования [13].

Перенесем основные параметры моделируемого двигателя, такие как сопротивление статора (R_s), индуктивность фаз (L_d, L_q), момент нагрузки (p), крутящий момент (B), момент инерции (J), магнитный поток (φ_m).

В дополнение к ранее заданным параметрам необходимо откорректировать значение частоты в блоках Sine Wave, установив её на уровне ~ 105 рад/с (что соответствует 1000 об/мин). Амплитуду сигнала следует задать равной 240 для всех трёх блоков, а фазы настроить на значения $0, -\frac{2\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3}$ соответственно — это обеспечит корректное моделирование трёхфазной системы напряжений с заданной частотой вращения электродвигателя. Также необходимо указать конструктивную постоянную, которая в данном случае принимается равной единице. При необходимости могут быть добавлены дополнительные блоки Scope для наблюдения за интересующими переменными. Время симуляции устанавливается равным 2 секундам, что, несмотря на сравнительно короткий интервал, позволяет получить достаточный объём информации для анализа поведения модели.

Произведем моделирование по этим данным и через блок Scope посмотрим результат моделирования по управлению оборотами электродвигателя, рисунок 5. Из рисунка 4 видно, что количество оборотов вышло на заданный нами уровень (~ 105 рад/сек = 1000 об/мин).

Для моделирования вибрационных воздействий, сопровождающих работу электродвигателя, в модель добавляется возмущающее воздействие на механический момент с использованием суммирующего блока Sum (рисунок 5). Вибрации, как форма механических

колебаний, описываются параметрами частоты, амплитуды, а также производными — скоростью и ускорением [14].



Рисунок 4. Данные блока Scope электрического крутящего момента

Figure 4. Data from the Scope block for electrical torque

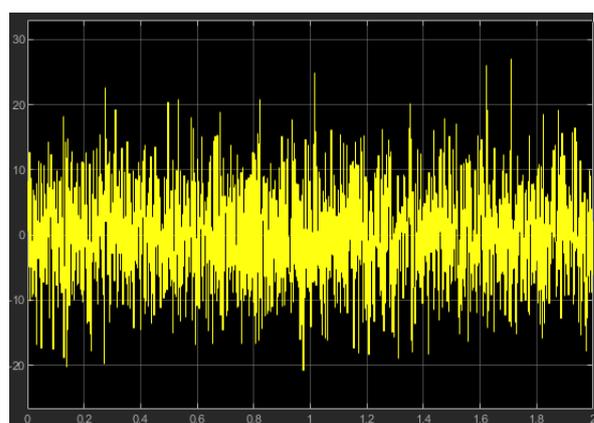


Рисунок 5. Результаты работы блока Random Number

Figure 5. Results of the Random Number block operation

В среде Simulink доступны два инструмента для генерации случайных вибрационных сигналов:

- Band-Limited White Noise, моделирующий белый шум с заданной полосой частот,
- Random Number, формирующий последовательность с нормальным распределением.

Хотя белый шум является полезной теоретической моделью с коротким временем корреляции, он не отражает реальных условий эксплуатации, где шумовые воздействия имеют физическую природу и ограниченный спектр. Поэтому в данной работе используется блок Random Number — более реалистичный и управляемый источник случайных колебаний (рисунок 5). Он позволяет задавать параметры:

среднее значение, дисперсию и частоту генерации. В рассматриваемом случае применяются следующие значения:

- Среднее значение: 0;
- Дисперсия: 50;
- Частота обновления: 0.001 с.

Сгенерированный сигнал поступает на вход блока Sum, где накладывается на текущую угловую скорость ротора ω_m . Выходной сигнал поступает на блоки Scope для визуализации поведения системы. При этом один блок Scope отображает сам шумовой сигнал, а второй — результирующую вибронегруженность вращения (рисунок 5). Продолжительность моделирования составляет 2 секунды, что позволяет зафиксировать как установившийся режим, так и переходные процессы без избыточной детализации.

При наличии экспериментальных данных с аналогичного электродвигателя можно провести сопоставление с модельным сигналом, что особенно важно для задач диагностики.

Для анализа спектрального состава полученного вибрационного сигнала используется встроенный в powergui инструмент FFT Analyzer (рисунок 6). После завершения симуляции задаются следующие параметры:

1. Structure with time — выбор анализируемого сигнала (VibroSignal);
2. Start time — 1.5 с (для исключения пускового фронта);
3. Number of cycles — 20;
4. Zoom on — режим Signal (для отображения как всей записи, так и выделенного участка);
5. Fundamental frequency — 16.7 Гц, соответствующая частоте вращения 1000 об/мин;
6. Max frequency — 1000 Гц (в 10 раз выше частоты возбуждения для обеспечения наглядности);
7. Display style — Bar (гистограмма амплитудного спектра).

После нажатия «Compute FFT» формируется спектр сигнала (рисунок 6), на котором отчетливо выделяются пиковые значения, включая основную гармонику на 16.7 Гц и кратные ей частоты. Также наблюдается характерное затухание с ростом частоты, обусловленное ограниченным спектром шумового сигнала, что подтверждает корректность реализации вибрационного воздействия и спектрального анализа [14, 15, 16]

Для реализации наложения вибрационного воздействия на сигнал механического момента электродвигателя, в модель Simulink необходимо добавить следующие элементы: блок Random Number, блок Sum, а также два

блока Scope для визуализации результатов [16]. Сигнал, генерируемый блоком Random Number, подается на один вход блока суммирования (Sum), а на другой вход поступает сигнал угловой скорости электродвигателя $\omega_m \omega_{mwm}$. Выходы обоих блоков (Sum и Random Number) подключаются к отдельным блокам Scope для наблюдения за сигналами.

Для обеспечения быстродействия модели целесообразно задать небольшое время моделирования. Это позволяет оперативно получать данные и анализировать динамику системы.

В случае наличия экспериментальных данных с реального электродвигателя, их можно наложить на синтетически полученные данные модели и провести сравнительный анализ.

Для спектрального анализа сигналов используется модуль FFT Analyzer, входящий в состав блока powergui из пакета Simulink. Он позволяет выполнить быстрое преобразование Фурье (БПФ) сигнала вибрации и выделить его частотные компоненты.

После завершения моделирования в Simulink необходимо открыть FFT Analyzer и задать следующие параметры для проведения анализа:

1. Structure with time — выбор целевого сигнала (в данном случае, сигнал с вибрацией VibroSignal, переименованный через настройки блока Scope 8);
2. Start time — начальный момент анализа. Для исключения переходных процессов рекомендуется установить значение 1,5 секунды;
3. Number of cycles — количество анализируемых циклов (например, 20);
4. Zoom on — тип отображения (выбирается Signal, чтобы видеть весь сигнал с выделенным фрагментом);
5. Fundamental frequency — основная частота. Поскольку электродвигатель вращается со скоростью 1000 об/мин, она соответствует приблизительно 16,7 Гц;
6. Max frequency — максимальная отображаемая частота (например, 1000 Гц, что в 10 раз превышает частоту возбуждающей вибрации в 100 Гц для наглядности спектра);
7. Display style — стиль отображения результатов (например, Bar — столбчатая диаграмма).

После ввода всех параметров следует нажать кнопку Compute FFT, в результате чего будет сформирован спектр вибрационного сигнала, позволяющий проанализировать частотные составляющие и выявить аномалии (см. рисунок 6).

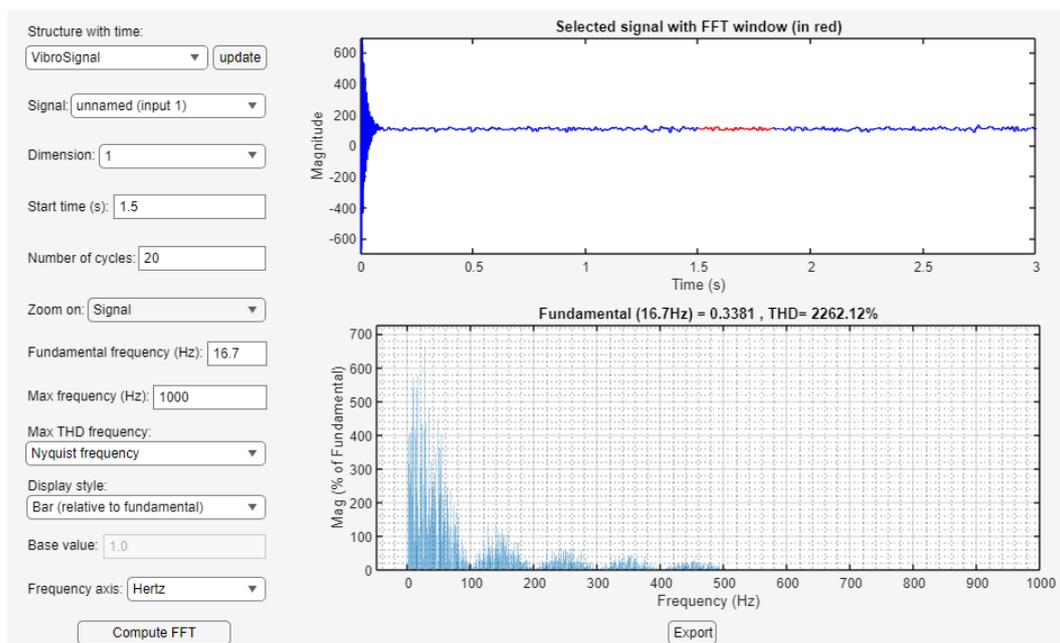


Рисунок 6. Результаты преобразования Фурье

Figure 6. Results of the Fourier Transform

Анализ результатов БПФ показывает, что преобразование сигнала с включённой вибрацией выполнено корректно: на спектре чётко прослеживаются пиковые значения, превышающие основную частоту вращения (16,7 Гц). Также наблюдается характерная периодичность спектра с интервалом около 100 Гц, что обусловлено дискретной природой моделируемой системы, сопровождающейся затухающими гармониками в более высокочастотной области.

Заключение

В данной работе разработана и реализована математическая модель синхронного электродвигателя с постоянными магнитами на основе дифференциальных уравнений, описывающих электрические и механические процессы. Для построения модели использованы реальные паспортные данные двигателя се-

рии ДВУ5М215 и программная среда MATLAB Simulink.

Модель успешно прошла верификацию по ключевым параметрам — угловая скорость, крутящий момент, токи фаз и мощность соответствуют заданным характеристикам. Также в модель интегрирован механизм имитации вибрационных воздействий, что позволяет учитывать возможные неисправности и аномалии в работе двигателя.

Проведён спектральный анализ результатов моделирования с использованием быстрого преобразования Фурье, выявивший характерные частотные компоненты при наличии вибраций.

Разработанная модель может быть использована для диагностики и прогнозирования отказов синхронных электродвигателей, а также как учебный и исследовательский инструмент для анализа динамики электромеханических систем.

Литература

1. Zhou, Y. (2022). A Simplified LPTN Model for a Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor under Inter-Turn Short-Circuit Faults. In *Energies* (Vol. 15, Issue 22, p. 8651). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en15228651>
2. Xu, X., Han, Q., & Chu, F. (2018). Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines. In *Energies* (Vol. 11, Issue 7, p. 1779). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en11071779>
3. Gubarevych, O., Gerlici, J., Gorobchenko, O., Kravchenko, K., & Zaika, D. (2023). Analysis of the features of application of vibration diagnostic methods of induction motors of transportation infrastructure using mathematical modeling. In *Diagnostyka* (Vol. 24, Issue 1, pp. 1–10). Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej. <https://doi.org/10.29354/diag/161308>

4. Г. Олссон, Д. Пиани Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. – 260 с.
5. А.А.Денисов, Д.Н.Колесников. Теория больших систем управления: Учебник для студентов вузов. - Л.: Энергоиздат, 1982. – 288 с.
6. Mikerov A.G., Djankonov V.V. Small electrical mashines and drives Texibook| SPb.: SPbSETU «LETI», 2002.
7. В. А. Полковников, Б. И. Петров и др. Электроприводы летательных аппаратов: Учебник для авиационных вузов. М.: Машиностроение, 1990. - 352 с.
8. Каримов Х.Г. Бесконтактный регулируемый электропривод. Ташкент, Издательство «Фан» Узбекской ССР, 1982, 144 с.
9. Jepshtejn I.I. Avtomatizirovannyj jelektroprivod peremennogo toka. – М.: Jenergoizdat, 1982. – 192 s.
10. М.Н.Анисимов, В.И.Роговой, Д.Д.Богаченко, Ю.М.Гусяцкий, С.В.Жуков. Частотно – регулируемый асинхронный электропривод на базе запираемых тиристоров и микропроцессорного управления. Сборник научных трудов «Методы и средства повышения технического уровня электроприводов», № 132, с. 102 – 112.
11. В.И.Цветков. Электрические микромашини. Учебное пособие, ч.1.СПб, СПбГУКиТ. 2005. – 156 с.
12. Mohamad Farid Fazdi, Po-Wen Hsueh, Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor: A Review, - Electronics 2023;
13. David Vindel, Simulation and Implementation of a PMSM Drive System, Göteborg, Sweden 2021;
14. M. Norton, D. Karczub, Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers. Cambridge university Press, 2019;
15. G. van Nijen, P. van Dalen, G. A. Dimitrov, V. van Ravesteijn, J. Stam, F. Tatar, Noise and Vibration in bearing Systems. Tech. Rep. NL15E005, SKF Engineering & Research Centre B.V., 2015;
16. Gorgy Szeidl, Laszlo Peter Kiss, - Mechanical Vibrations. An Introduction, Foundations of Engineering Mechanics, - Springer Nature Switzerland AG, 2020, 456p

References

1. Zhou, Y. (2022). A Simplified LPTN Model for a Fault-Tolerant Permanent Magnet Motor under Inter-Turn Short-Circuit Faults. *Energies*, 15(22), 8651. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en15228651>
2. Xu, X., Han, Q., & Chu, F. (2018). Review of Electromagnetic Vibration in Electrical Machines. *Energies*, 11(7), 1779. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en11071779>
3. Gubarevych, O., Gerlici, J., Gorobchenko, O., Kravchenko, K., & Zaika, D. (2023). Analysis of the Features of Application of Vibration Diagnostic Methods of Induction Motors of Transportation Infrastructure Using Mathematical Modeling. *Diagnostyka*, 24(1), 1–10. Polish Society of Technical Diagnostics. <https://doi.org/10.29354/diag/161308>
4. Olsson, G., & Piani, D. (2001). Digital Automation and Control Systems. St. Petersburg: Nevsky Dialect. 260 p.
5. Denisov, A. A., & Kolesnikov, D. N. (1982). Theory of Large Control Systems: *A Textbook for University Students*. Leningrad: Energoizdat. 288 p.
6. Mikerov, A. G., & Djankonov, V. V. (2002). Small Electrical Machines and Drives: Textbook. St. Petersburg: SPbSETU "LETI".
7. Polkovnikov, V. A., Petrov, B. I., et al. (1990). Electric Drives for Aircraft: A Textbook for Aviation Universities. Moscow: Mashinostroenie. 352 p.
8. Karimov, Kh. G. (1982). Contactless Adjustable Electric Drive. Tashkent: Fan Publishing House of the Uzbek SSR. 144 p.
9. Jepshtejn, I. I. (1982). Automated AC Electric Drive. Moscow: Energoizdat. 192 p.
10. Anisimov, M. N., Rogovoy, V. I., Bogachenko, D. D., Gusyatsky, Yu. M., Zhukov, S. V. (Year unknown). Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drive Based on Lockable Thyristors and Microprocessor Control. In: Scientific collection Methods and Means of Improving the Technical Level of Electric Drives, No. 132, pp. 102–112.
11. Tsvetkov, V. I. (2005). Electrical Micromachines. Study Guide, Part 1. St. Petersburg: SPbGUKiT. 156 p.

12. Mohamad Farid Fazdi, & Po-Wen Hsueh. (2023). Parameters Identification of a Permanent Magnet DC Motor: A Review. *Electronics*.
13. Vindel, D. (2021). *Simulation and Implementation of a PMSM Drive System*. Gothenburg, Sweden.
14. Norton, M., & Karczub, D. (2019). *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge University Press.
15. Van Nijen, G., van Dalen, P., Dimitrov, G. A., van Ravesteijn, V., Stam, J., & Tatar, F. (2015). *Noise and Vibration in Bearing Systems*. Technical Report NL15E005, SKF Engineering & Research Centre B.V.
16. Szeidl, G., & Kiss, L. P. (2020). *Mechanical Vibrations: An Introduction*. Foundations of Engineering Mechanics. Springer Nature Switzerland AG. 456 p.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Симонов Ергей Евгеньевич	старший преподаватель, Московский технический университет связи и информатики, s.e.simonov@mtuci.ru SPIN-код: 9431-0321 ORCID: 0000-0003-3391-8064

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Simonov Sergey Evgenevich	senior lecturer, Moscow technical university of communications and informatics, s.e.simonov@mtuci.ru SPIN-code: 9431-0321 ORCID: 0000-0003-3391-8064

статья поступила в редакцию 03.06.2025	одобрена после рецензирования 19.06.2025	принята к публикации 26.06.2025
the article was submitted 03.06.2025	approved after reviewing 19.06.2025	accepted for publication 26.06.2025

ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ БОТОВ

Сергей Викторович Жданов

¹

se222redja@yandex.ru

Людмила Анатольевна Коробова

¹

Lyudmila_korobova@mail.ru

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

Аннотация. В последние годы наблюдается стремительный рост популярности чат-ботов как инструментов автоматизации общения, поддержки пользователей и выполнения бизнес-процессов. Понятие «бот» уже прочно вошло в современный обиход IT-специалиста. Рассматриваются для чат-бота как полезные качества, помогающие и упрощающие ряд действий пользователя, так и отрицательные. Чат-боты используются для различных целей, таких как автоматизация общения с клиентами, рассылка информации, поиск данных и выполнение рутинных операций. Боты значительно упрощают выполнение рутинных задач и улучшают взаимодействие с клиентами, однако важно учитывать их потенциальные риски и злоупотребления. Благодаря широкому распространению мессенджеров и платформ для командной работы, таких как Discord, Telegram, Slack и Microsoft Teams, боты стали неотъемлемой частью цифровой среды. Они используются в самых разных сферах — от customer support и HR до образования, развлечений и управления IT-инфраструктурой. В рамках данной работы проведен анализ и существующих платформ. Приведено экономическое обоснование разработки отечественной платформы. Создание аналогов международных платформ — это вклад в развитие российской разработки и возможность последующего экспорта решений на дружественные рынки.

Ключевые слова: мессенджеры, платформы, цифровая среда, IT-инфраструктура, чат-боты, API, SDK.

Для цитирования: Жданов С. В., Коробова Л. А. Обоснование разработки отечественной платформы для применения ботов // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 47-55.

Original article

JUSTIFICATION OF DEVELOPMENT OF A DOMESTIC PLATFORM FOR USE OF BOTS

Sergey V. Zhdanov

¹

se222redja@yandex.ru

Lyudmila A. Korobova

¹

Lyudmila_korobova@mail.ru

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

Abstract. In recent years, there has been a rapid growth in the popularity of chatbots as tools for automating communication, user support and performing business processes. The concept of "bot" has already firmly entered the modern everyday life of an IT specialist. Both useful qualities of a chatbot that help and simplify a number of user actions, as well as negative ones, are considered. Chatbots are used for various purposes, such as automating communication with clients, sending information, searching for data and performing routine operations. Bots significantly simplify the performance of routine tasks and improve interaction with clients, but it is important to consider their potential risks and abuses. Due to the widespread use of messengers and teamwork platforms such as Discord, Telegram, Slack and Microsoft Teams, bots have become an integral part of the digital environment. They are used in a variety of areas - from customer support and HR to education, entertainment and IT infrastructure management. As part of this work, an analysis of existing platforms was carried out. An economic justification for the development of a domestic platform is provided. The creation of analogues of international platforms is a contribution to the development of Russian development and the possibility of subsequent export of solutions to friendly markets.

Keywords: messengers, platforms, digital environment, IT infrastructure, chatbots, API, SDK.

For citation: Zhdanov S. V., Korobova L. A. Justification of development of a domestic platform for use of bots. *Ingenierne tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 47-55. (In Russ.).

Введение

Появление мощных API и открытых SDK значительно упростило процесс разработки ботов. Однако каждая платформа предъявляет свои технические требования и ограничения, что влияет как на процесс создания, так

и на возможность масштабирования решений. Возникает вопрос: насколько легко разработать бота под одну платформу и, при необходимости, перенести его на другую? Это особенно актуально в условиях растущей зависимости от иностранных сервисов и потенциальных

рисков ограниченного доступа к зарубежным IT-решениям.

В условиях санкционного давления и стремления к технологическому суверенитету в России все острее встает вопрос о необходимости создания собственных платформ для разработки и применения ботов. Такая инициатива требует не только технологической, но и экономической оценки — как с точки зрения разработки, так и перспектив коммерциализации.

Цель статьи — провести комплексный анализ существующих платформ для создания и эксплуатации чат-ботов, оценить возможность переноса решений между ними, выявить потребность в отечественной альтернативе и рассчитать примерную стоимость её разработки. В рамках исследования будет рассмотрено, насколько разумна и оправдана разработка российской платформы для ботов с точки зрения затрат, перспектив развития и соответствия современным требованиям бизнеса и государства.

Материал и методы исследования

В настоящее время существует широкий спектр цифровых платформ, позволяющих создавать, развёртывать и использовать чат-ботов в самых различных целях. Эти платформы предоставляют разработчикам API, SDK, инструменты отладки, хостинг и документацию, что существенно снижает порог входа и ускоряет разработку. Однако каждая платформа имеет свою специфику, ограничения и целевые аудитории, что влияет как на удобство разработки, так и на возможности коммерческого и организационного применения ботов.

Рассмотрим ключевые платформы, на которых на сегодняшний день можно эффективно разрабатывать и применять чат-ботов. На рисунке 1 представлена диаграмма распределения платформ для разработки ботов по пяти критериям оценки: - API доступность; - легкости интеграции; - поддержке ботов; - безопасности; - поддержке локализации.

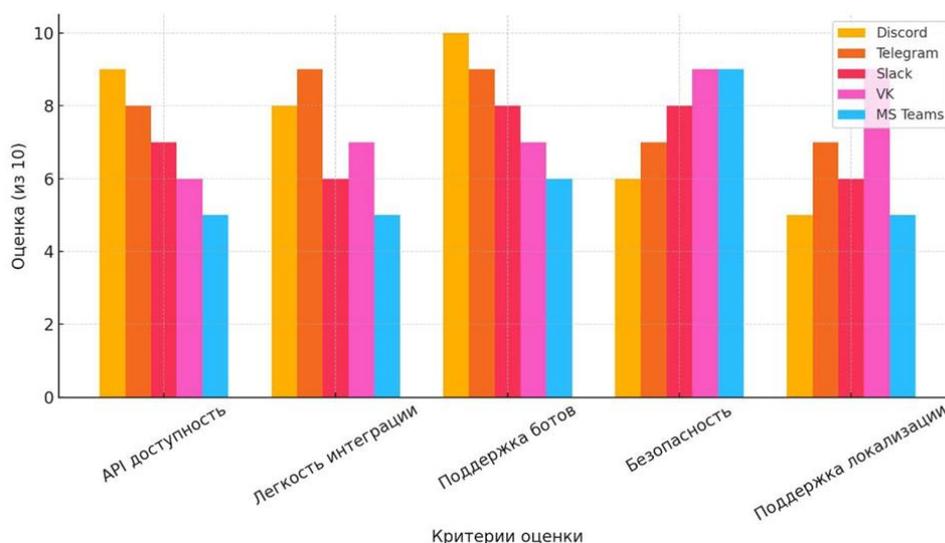


Рисунок 1. Сравнение платформ для разработки ботов

Figure 1. Comparison of bot development platforms

Ниже приведён краткий обзор наиболее известных и активно используемых платформ, с краткой характеристикой каждой из них:

Discord - платформа, изначально созданная для геймеров, но со временем переросшая в универсальный коммуникационный инструмент с мощной системой серверов и каналов.

- Поддержка кастомных ботов через Discord API (REST + WebSocket),
- библиотеки на разных языках (discord.js, discord.py и др.),
- поддержка интерактивных команд, кнопок, меню и событий,
- подходит для сообществ, образования, внутреннего использования.

Telegram - одна из самых популярных платформ в России и СНГ.

- Открытое Bot API,
- простота интеграции и настройки,
- возможность размещения бота на любом сервере,
- множество доступных библиотек (python-telegram-bot, Telethon и др.),
- подходит как для массовых пользователей, так и для бизнеса.

Slack - платформа для корпоративного общения, активно используется в ИТ-среде.

- Поддержка ботов через Slack API и Bolt SDK,

- гибкая система интерактивных компонентов и ивентов,
- хорошая интеграция с CI/CD, Jira, GitHub,
- подходит для автоматизации корпоративных процессов.

Microsoft Teams - корпоративная платформа от Microsoft, активно внедряется в гос-секторе и крупных компаниях.

- Использует Bot Framework от Microsoft,
- возможность использования Adaptive Cards,
- интеграция с Microsoft 365, Outlook, SharePoint,
- требует подписки и авторизации через Azure.

VK (VKонтакте) - Российская социальная сеть, поддерживающая ботов в рамках сообщества.

- Использует Callback API и VK API,
- возможность создания сценариев ответов,
- ограниченные возможности по сравнению с Telegram или Discord,
- подходит для массового взаимодействия с пользователями в рамках социальной сети.

WhatsApp (через Business API) - популярный мессенджер, но требует подключения через платные сервисы.

- Доступ к API предоставляется через Meta,
- необходима верификация и использование посредников (Twilio, 360Dialog и др.),
- ориентирован на бизнес-применение,
- жесткие ограничения по шаблонам сообщений и стоимости.

Перенос ботов между платформами

Основные сложности переноса бота между платформами. На первый взгляд, перенос чат-бота с одной платформы на другую может показаться задачей, сводящейся к изменению API и интерфейсов. Однако на практике этот процесс требует гораздо большего объема работ из-за различий в архитектуре, логике взаимодействия с пользователем, ограничениях платформ и особенностях интеграции.

Ниже рассмотрены ключевые трудности, с которыми сталкиваются разработчики при переносе бота с одной платформы (например, Discord) на другие (Telegram, VK, Slack и т.д.):

Различие API и событийной модели

Каждая платформа имеет собственную структуру API, механизмы подписки на события и обработки команд. Например, в Discord

широко используется событийная модель с WebSocket-подключением, в то время как Telegram работает по модели «pull» через getUpdates или «push» через Webhook.

- Требуется переработка логики подписки на события,
- необходима адаптация под другой формат сообщений и взаимодействий.

Отличия в пользовательском интерфейсе

Интерфейсные возможности сильно варьируются:

- Discord поддерживает вложенные команды (slash commands), выпадающие меню, кнопки и реакции на сообщения,
- Telegram предоставляет кнопки, инлайн-клавиатуры, callback-запросы, но не поддерживает такие структуры, как каналы с правами, голосовые комнаты и пр.,
- Slack поддерживает "blocks", "modals", контекстные меню, но требует сложной конфигурации и авторизации.

Все эти различия требуют переписывания интерфейсной части бота и его логики.

Библиотеки и фреймворки

Обычно боты пишутся с использованием платформоспецифичных библиотек (например, discord.py, aiogram, Slack Bolt, vk_api). Эти библиотеки не совместимы между собой.

- Код приходится переписывать или полностью заменять,
- иногда возможно частичное переиспользование бизнес-логики, но не интерфейсов.

Идентификация и хранение данных пользователей

Идентификаторы пользователей, чат-каналов, сообщений и т.д. уникальны для каждой платформы.

- Требуется адаптация базы данных или миграция данных,
- невозможно напрямую сохранить ссылку между пользователями Discord и Telegram.

Авторизация и безопасность

Каждая платформа имеет свой подход к безопасности и авторизации: OAuth 2.0, token-based авторизация, webhook-секреты и пр. Перенос требует пересмотра систем безопасности, особенно если бот взаимодействует с внешними API или содержит персональные данные.

Различия в политике использования и ограничениях

Telegram и Discord предоставляют API бесплатно, но с ограничениями по частоте. WhatsApp требует платной бизнес-подписки.

Slack ограничивает использование API в бесплатных рабочих пространствах.

Нужно учитывать риски блокировок, лимитов и платных функций при миграции.

Ментальная модель пользователя

Пользователи платформ по-разному взаимодействуют с ботами. В Telegram ожидают диалогового общения. В Discord — командного взаимодействия в каналах. В Slack — автоматизации рутины в командах. Это требует изменения структуры диалогов и интерфейсов.

Таким образом, перенос бота между платформами — это не просто технический процесс, а комплексная задача, включающая

переработку архитектуры, кода, интерфейсов и логики. В большинстве случаев проще использовать многоплатформенную архитектуру изначально или разрабатывать отдельные версии бота для каждой платформы.

Результаты исследования и их обсуждения

Оценка затрат и выводы

На основе анализа трудозатрат, финансовых расходов и технических особенностей можно сформулировать обобщённую оценку переноса бота с платформы Discord на другие популярные платформы (таблица 1).

Таблица 1. Оценка затрат

Table 1. Cost estimation

Тип затрат / Cost type	Комментарий / Comment	Оценка (ориентировочно) / Estimate (approximate)
Человеко-часы	Зависит от сложности: 50–300+ часов	от 1 до 2 месяцев работы
Финансовые затраты	При ставке 1200–2000 руб/час	от 60 000 до 600 000+ руб.
Переписывание кода	От 40% (простые боты) до 80% (сложные, с UI/интеграциями)	Высокие трудозатраты
Тестирование и отладка	Полный цикл заново, особенно при переносе логики взаимодействия	15–25% от общего времени
Переобучение команды	Изучение новых API, библиотек, особенностей UX	от 2 до 10 дней
Риски и ошибки	Возможны баги, потери данных, отказ пользователей	Невозможно исключить полностью

Нефинансовые последствия

Потеря части пользовательской базы: пользователи, привыкшие к определенной платформе, не всегда готовы переходить на другую.

Репутационные риски: возможные сбои или некорректная работа бота на новой платформе могут привести к негативной реакции.

Время простоя: миграция часто требует отключения текущего бота или его дублирования, что вызывает задержки в обслуживании.

Перенос бота между платформами — затратный процесс, как по времени, так и по деньгам. В большинстве случаев перенос подразумевает не просто «адаптацию», а переработку архитектуры и логики. Чем сложнее бот, тем менее целесообразно его переносить, особенно если он тесно интегрирован с внутренними API, системами аутентификации или UI-функциями платформы. При разработке нового проекта следует сразу выбирать платформу, соответствующую целям и аудитории, либо проектировать решение с возможностью масштабирования на несколько платформ. В долгосрочной перспективе компании могут рассматривать разработку универсального фреймворка или ядра, которое позволит адаптировать логику под разные среды с минимальными затратами.

Необходимость в разработке отечественной платформы для ботов

Современные реалии — геополитическая нестабильность, санкционное давление, зависимость от зарубежных IT-решений — обостряют вопрос технологического суверенитета России. Боты, как инструменты автоматизации, интеграции и взаимодействия с пользователями, играют всё более важную роль в цифровых продуктах, госуслугах и бизнесе. Возникает необходимость рассмотреть, насколько оправдана разработка собственной отечественной платформы для их создания и применения.

Аргументы в пользу создания отечественной платформы:

- устранение зависимости от иностранных сервисов. Большинство популярных платформ (Discord, Telegram, Slack, Microsoft Teams) — иностранные продукты. Они могут быть ограничены, заблокированы или подвергнуты политическому воздействию. Наличие отечественной платформы позволит защититься от подобных рисков;

- контроль над пользовательскими данными и безопасностью. Платформы, находящиеся под контролем иностранных компаний, не всегда соответствуют требованиям

локального законодательства по защите персональных данных (ФЗ-152). Отечественное решение может быть изначально адаптировано под российские стандарты ИБ;

- интеграция с государственными и отраслевыми ИТ-системами. Отечественная платформа может быть тесно интегрирована с госуслугами, «ГосТехом», ЕПГУ, региональными ЦУР и другими сервисами. Это критически важно для применения ботов в госсекторе;

- гибкость в регулировании и кастомизации. Собственное решение можно быстро адаптировать под конкретные требования заказчиков, отраслевые стандарты, создать специализированные SDK, модули и UI-компоненты;

- развитие отечественной ИТ-индустрии и экспортного потенциала. Создание аналогов международных платформ — это вклад в развитие российской разработки и возможность последующего экспорта решений на дружественные рынки.

Риски и вызовы при создании такой платформы:

1. Высокие затраты на разработку и поддержку. Создание стабильной, масштабируемой и функциональной платформы требует многомиллионных инвестиций, команды специалистов и длительного времени.

2. Низкий уровень доверия и инерция пользователей. Бизнес и пользователи привыкли к Telegram, Discord, Slack. Убедить их перейти на новую платформу будет сложно без явных преимуществ.

3. Проблема критической массы. Без достаточного количества пользователей и разработчиков экосистема не заработает. Необходимы стимулы и госпрограммы поддержки.

4. Конкуренция с уже существующими продуктами. Некоторые российские решения (VK, Сбер, Яндекс) уже внедряют ботов в свои экосистемы. Новая платформа должна предложить уникальную ценность, а не дублировать существующее.

Примеры частичного опыта в РФ:

- VK API и Callback API: подходит для простых ботов, но ограничен в функциональности;

- Сбер и Яндекс-боты: используются внутри экосистем, но недоступны как универсальные платформы;

- TrueConf, Tamtam, ICQ: попытки создать альтернативы мессенджерам, но без широкой популярности;

- ГосТех (Минцифры): потенциальная база для интеграции в будущем.

Необходимость в создании отечественной платформы для разработки и применения ботов — высокая, особенно в стратегических отраслях, госсекторе и образовательной сфере. Однако реализация этого проекта требует серьезной государственной поддержки, устойчивой ИТ-команды и четкого понимания конкурентных преимуществ.

Экономическая оценка разработки отечественной платформы для ботов

Создание универсальной платформы для разработки и применения чат-ботов в России — это масштабный ИТ-проект, требующий обоснованных инвестиций, поэтапного развития и системной поддержки. Ниже рассмотрена предварительная экономическая модель оценки затрат, возможных источников финансирования и окупаемости такого проекта.

В таблице 2 представлены основные статьи расходов в денежном эквиваленте при разработке отечественной платформы для ботов.

Таблица 2. Статьи расходов

Table 2. Cost items

Статья расходов / Cost item	Содержание / Content	Оценка затрат (в рублях) / Cost estimate (in rubles)
Аналитика и проектирование	Исследование рынка, UX/UI, архитектура, документация	5–10 млн
Разработка ядра платформы	Серверная часть, API, SDK, авторизация, событийная модель	20–30 млн
Разработка интерфейсов	Web-интерфейс, мобильное приложение, клиентская часть	10–20 млн
Хостинг, инфраструктура, DevOps	Серверы, балансировка, базы данных, CI/CD	5–15 млн (в год)
Информационная безопасность	Шифрование, защита API, аудит	3–5 млн
Команда и зарплаты (12 мес)	15–20 человек (разработчики, тестировщики, менеджеры)	40–70 млн
Тестирование, пилотные внедрения	Закрытые тесты, нагрузочное тестирование	3–6 млн
Маркетинг и привлечение пользователей	Промо, интеграции, партнерские программы	5–10 млн

Итого: 90–160 млн рублей на запуск MVP и выход на рынок.

На рисунке 2 показано наглядное представление распределения денежных средств по

статьям расходов необходимых для создания отечественной платформы. Структура расходов представлена в виде круговой диаграммы.



Рисунок 2. Структура расходов на создание отечественной платформы

Figure 2. Cost structure for the creation of a domestic platform

Источники финансирования:

- государственные гранты и субсидии (Минцифры, ФРИИ, РВК);
- бюджет крупных госструктур или государственно-частное партнерство;
- инвестиции корпоративных клиентов (например, Сбер, Ростелеком);
- привлечение частных инвесторов (венчурных фондов);
- инкубаторы и акселераторы (Сколково, РЭЦ).

При успешной реализации платформа может:

- снизить ежегодные затраты госсектора на сторонние решения и лицензии;

- открыть внутренний рынок кастомных ботов для образования, медицины, ЖКХ и др.;
- стать экспортным продуктом для стран ЕАЭС и дружественных государств;
- создать экосистему из разработчиков, готовых модулей, marketplace решений;
- обеспечить импортозамещение и повысить технологическую независимость.

Показатели анонсирования окупаемости разработки отечественной платформы представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сценарий окупаемости

Table 3. Payback scenario

Показатель / Indicator	Оценка / Estimation
Год запуска (MVP)	Через 12–15 месяцев
Выход на самоокупаемость	Через 2–3 года
Потенциальная клиентская база	10 000+ разработчиков, 500+ компаний
Средняя подписка (b2b)	3 000–15 000 руб/мес
Годовой оборот через 3–4 года	150–300 млн руб

Экономическая целесообразность разработки отечественной платформы для ботов подтверждается потенциальным масштабом применения и высоким уровнем зависимости от за-

рубежных решений. При разумной модели монетизации, господдержке и фокусе на корпоративный сектор проект может выйти на самоокупаемость в течение 4 лет и сыграть важную

роль в обеспечении цифрового суверенитета страны. Динамика изменения потенциальной

выручки по годам от использования отечественной платформы показан на рисунке 3.

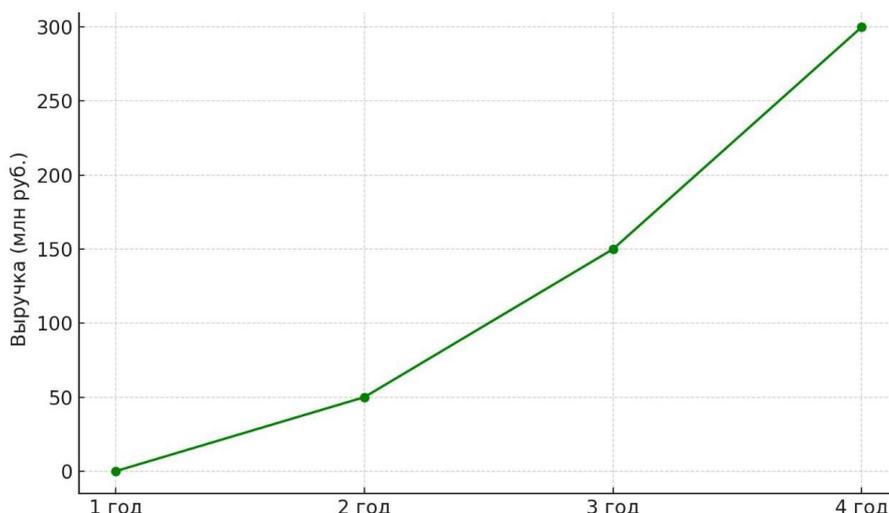


Рисунок 3. Потенциальная выручка от использования отечественной платформы

Figure 3. Potential revenue from using a domestic platform

Заключение

Чат-боты становятся важным инструментом цифрового взаимодействия между пользователями, организациями и государственными структурами. Современные платформы, такие как Discord, Telegram, Slack и другие, предоставляют широкие возможности для их разработки, однако полностью зависят от иностранных технологических решений. Это создает риски в условиях санкционного давления и необходимости соблюдения отечественных стандартов безопасности и конфиденциальности.

Анализ существующих платформ показал, что каждая из них имеет сильные и слабые стороны, но ни одна не обеспечивает полной адаптации под потребности российского рынка. Перенос ботов между платформами сопря-

жён с высокими трудозатратами, финансовыми расходами и организационными рисками, что делает процесс сложным и затратным.

С учётом вышеизложенного, создание отечественной универсальной платформы для разработки и применения ботов представляется не только целесообразным, но и стратегически важным. Такой проект требует значительных инвестиций, профессиональной команды и государственной поддержки, однако способен принести долгосрочные выгоды: усиление технологической независимости, развитие цифровой инфраструктуры, снижение расходов в госсекторе и создание новой ИТ-экосистемы.

Таким образом, запуск российской платформы для чат-ботов — это инвестиция не только в конкретный продукт, но и в цифровое будущее страны.

Литература

1. Сахинский, М. В. Чат - боты: прошлое, настоящее и будущее / М. В. Сахинский, Л. А. Коробова // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2024. – № 3-4(33-34). – С. 182-187. – EDN QXQEYG.
2. Коробова, Л. А. Чат-бот как виртуальный помощник формирования заявок на обслуживание / Л. А. Коробова, Ю. И. Новикова // Инженерные технологии. – 2024. – № 2(6). – С. 45-53.
3. Коробова, Л. А. Разработка виртуального консультанта для медицинского центра с использованием искусственного интеллекта / Л. А. Коробова, А. И. Головин // Инженерные технологии. – 2024. – № 3(7). – С. 23-34.
4. Official Discord API Documentation [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://discord.com/developers/docs>
5. Telegram Bot API Documentation [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://core.telegram.org/bots/api>

6. Slack API Documentation [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://api.slack.com/>
7. VK API Documentation [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://dev.vk.com/>.
8. Microsoft Teams Developer Platform [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/microsoftteams/platform/>
9. Минцифры России. Государственная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://digital.gov.ru/>
10. Аналитический отчет ФРИИ о развитии ИТ-стартапов в России. – Фонд развития интернет-инициатив, 2023.
11. Исследование рынка чат-ботов в мире и в России: Тренды 2023–2025 гг. – Data Insight, 2023.
12. Сколково: Программы поддержки ИТ-разработок. [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // URL: <https://sk.ru>.
13. ГОСТ Р 57580.1-2017. Безопасность финансовых (финтех) технологий.
14. ФЗ №152 «О персональных данных» (ред. 2024 г.) – КонсультантПлюс.
15. Обзор инструментов мультиплатформенной разработки ботов. [Электронный ресурс] / Заголовок с экрана // Хабр, 2024. – URL: <https://habr.com/ru/articles/738409/>.

References

1. Sakhinsky, M. V. Chatbots: past, present and future / M. V. Sakhinsky, L. A. Korobova // *Information technologies in construction, social and economic systems*. - 2024. - No. 3-4 (33-34). - P. 182-187. - EDN QXQEYG.
2. Korobova, L. A. Chatbot as a virtual assistant for generating service requests / L. A. Korobova, Yu. I. Novikova // *Engineering technologies*. - 2024. - No. 2 (6). - P. 45-53.
3. Korobova, L. A. Development of a virtual consultant for a medical center using artificial intelligence / L. A. Korobova, A. I. Golovin // *Engineering technologies*. – 2024. – No. 3(7). – P. 23-34.
4. Official Discord API Documentation [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://discord.com/developers/docs>
5. Telegram Bot API Documentation [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://core.telegram.org/bots/api>
6. Slack API Documentation [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://api.slack.com/>
7. VK API Documentation [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://dev.vk.com/>
8. Microsoft Teams Developer Platform [Electronic resource] / Title from the screen // URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/microsoftteams/platform/>
9. Ministry of Digital Development, Communications and Mass Media of the Russian Federation. State Program «Digital Economy of the Russian Federation» [Electronic resource] / Headline from the screen // URL: <https://digital.gov.ru/>
10. Analytical report of the IIDF on the development of IT startups in Russia. – Internet Initiatives Development Fund, 2023.
11. Research of the chatbot market in the world and in Russia: Trends 2023–2025 – Data Insight, 2023.
12. Skolkovo: IT development support programs. [Electronic resource] / Headline from the screen // URL: <https://sk.ru>
13. GOST R 57580.1-2017. Security of financial (fintech) technologies.
14. Federal Law No. 152 «On Personal Data» (as amended in 2024) – ConsultantPlus.
15. Review of tools for multi-platform bot development. [Electronic resource] / Headline from the screen // Habr, 2024. – URL: <https://habr.com/ru/articles/738409/>.

Сведения об авторах

<i>ФИО</i>	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Жданов Сергей Викторович	магистрант, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", магистрант кафедры Информационных технологий, моделирования и управления se222redja@yandex.ru
Коробова Людмила Анатольевна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Воронежский государственный университет инженерных технологий", доцент кафедры Информационных технологий, моделирования и управления, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-код 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X

Authors information

<i>Last name, first name, patronymic</i>	<i>Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)</i>
Zhdanov Sergey Viktorovich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master's student of the department of Information technology, modeling and management, se222redja@yandex.ru
Korobova Lyudmila Anatolyevna	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Information technology, modeling and management, Lyudmila_korobova@mail.ru SPIN-code 1098-6488 ORCID 0000-0003-1349-732X

статья поступила в редакцию 04.05.2025	одобрена после рецензирования 03.06.2025	принята к публикации 19.06.2025
the article was submitted 04.05.2025	approved after reviewing 03.06.2025	accepted for publication 19.06.2025

Научная статья

УДК 678

МОДИФИКАЦИЯ АДГЕЗИОННОГО ГРУНТА В КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ
РЕЗИНА : МЕТАЛЛ

Валерий Александрович Седых¹ cdxva@mail.ru
Владимир Андреевич Крюков¹ kryukovvladimir1602@gmail.com
Дарья Романовна Дыбова¹ ddr.bvbarmy01@gmail.com

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

Аннотация. С целью создания термореактивной клеевой композиции применяемой для соединения резиновых смесей на основе разнополярных каучуков с поверхностью стали, рассмотрены некоторые подходы к модификации триизоцианатами, клеевой композиции предназначенной для совулканизации разнополярных резиновых смесей на основе каучуков общего и специального назначения. В качестве грунта к металлу была испытана композиция на основе триизоцианата и полихлоропрена.

Ключевые слова: промотеры адгезии к металлам, термореактивные клеевые композиции, крепление резины к металлам, блокированные изоцианаты.

Для цитирования: Седых В. А., Крюков В. А., Дыбова Д. Р. Модификация адгезионного грунта в клеевом соединении резина : металл // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 56-68.

Original article

THE MODIFICATION OF THE ADHESIVE PRIMER IN THE ADHESIVE JOINT
RUBBER : METAL

Valery A. Sedykh¹ cdxva@mail.ru
Vladimir A. Kryukov¹ kryukovvladimir1602@gmail.com
Dar`ya R. Dybova¹ ddr.bvbarmy01@gmail.com

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

Abstract. In order to create a thermosetting adhesive composition used for bonding rubber mixtures based on rubbers of different polarity to a steel surface, some approaches to modification with triisocyanates of an adhesive composition intended for co-vulcanization of rubber mixtures based on general and special purpose rubbers of different polarity are considered. A composition based on triisocyanate and polychloroprene was tested as a primer for metal.

Keywords: promoters of adhesion to metals, thermosetting adhesive compositions, fixing of rubber to metals, blocked isocyanates.

For citation: Sedykh V. A., Kryukov V. A., Dybova D. R. The modification of the adhesive primer in the adhesive joint Rubber : Metal. *Ingenerynyye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 56-68. (In Russ.).

Введение

Современное машиностроение и строительство невозможно представить без применения резинометаллических композиционных материалов. С развитием техники, созданием новых машин и аппаратов появилась потребность в деталях, совмещающих механические свойства металлов с вибростойкостью, прочностью на истирание, антикоррозионной стойкостью и другими свойствами, присущими резине.

Наиболее известными промоторами адгезии резин к стальной поверхности являются различные диизоцианаты, полиизоцианаты и блокированные изоцианаты [1, 2].

В частности, в отечественной промышленности большое распространение получил клей, представляющий собой раствор триизоцианата в органическом растворителе, применяемый для горячего крепления резин на основе полихлоропрена (ПХ) и натурального каучука к различным металлам.

Триизоцианаты (ТИЦ), также применяются как отвердители для клеевых композиций в различных отраслях промышленности [3, 4]. Они обеспечивают плотную пространственную сшивку полимера клея. Благодаря этому обеспечивается высокая прочность крепления, стойкость клеевого соединения к

действию масел, растворителей, жидкого топлива, стойкость к действию горячей воды, кислот и щелочей.

Однако, ТИЦ подходят для крепления не всех видов резиновых смесей, обычно для крепления резины из синтетических каучуков общего назначения применяют полимерные клеи.

При применении полимерных клеев весомый вклад в образование прочного клеевого соединения с резиной, оказывает толщина диффузионного слоя, образующегося на границе между резиновой смесью и полимерным клеем. Для обеспечения прочного соединения с резиновыми субстратами различной природы широко применяют хлоропреновый каучук, так как в ряду самых распространенных каучуков общего и специального назначения он занимает промежуточное значение по величине полярности и может проникать как в неполярные, так и в полярные субстраты. Клеевые композиции на основе полихлоропрена обладают высокой стойкостью к воздействию агрессивных сред, воды и термоокислительной деструкции.

Одними из самых востребованных клеев горячего крепления резины к металлу являются клеи линейки «Хемосил» производимые в Германии, которые отличаются чрезвычайно высокой прочностью и износостойкостью при применении к резиновым смесям различной природы. В России предложены патенты на создание универсальной терморективной клеевой композиции такого типа [5 – 8]. Тем не менее, немецкие клеи все еще остаются востребованными на отечественном рынке.

Материал и методы исследования

Объектом исследования являлась растворная клеевая композиция на основе полихлоропрена содержащая фенолформальдегидную смолу, технический углерод, оксиды цин-

ка, магния и другие компоненты (далее по тексту К1). Обладая хорошей адгезией при склеивании резиновых смесей, содержащих непредельные неполярные каучуки, а также смесей на основе хлоропренового каучука, клеевая композиция может применяться самостоятельно для совулканизации резиновых смесей на основе разнополярных каучуков.

Для испытания клеевого соединения был применен метод определения прочности связи с металлом при отслаивании согласно ГОСТ 411-77.

В качестве эластичной подложки (субстрата) была выбрана резиновая смесь на основе СКС-30АРКМ-15 приготовленная по рецептуре 1А согласно ГОСТ Р 54555-2011 «Каучуки бутадиев-стирольные. Приготовление и испытание резиновых смесей».

В качестве жесткой подложки (субстрата) применялись опескоструенные стальные пластины (Ме).

Слои покровного клея К1 и грунта сушили 30 мин., если в примечании не указано обратное.

Условия вулканизации: температура в прессе – 150 °С; продолжительность – 30 мин; давление – 15 МПа.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве контрольного образца получено соединение резины с Ме включающее грунт «Хемосил 211» и покровный слой клея «Хемосил 411» (таблица 1.)

Далее в качестве образца сравнения была испытана немодифицированная клеевая композиция (К1). Показатели адгезии исходной клеевой композиции не установлены, так как образец разрушился при установке в разрывную машину. Характер разрыва образцов указан в таблице 2.

Таблица 1. Прочность связи клеевой композиции хемосил 411/211

Table 1. Bond strength of the chemosil 411/211 adhesive composition

Протокол испытаний №1 / Test Report No. 1		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: «Хемосил 211» Покровный слой: «Хемосил 411»	22	Когезионный по резине – 100%

Таблица 2 – Прочность связи клеевой композиции К1 без грунта

Table 2 – Bond strength of the K1 adhesive composition without primer

Протокол испытаний №2 / Test Report No. 2		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Клеевая композиция К1 без применения грунта	Отс.	Адгезионный на границе сталь/клей – 100%

Для повышения прочности связи клеевого соединения с поверхностью стали использован в качестве адгезионного грунта клей, представляющий собой 20%-й раствор 4, 4', 4'' – трифенилметантриизоцианата (ТФМТИ) в дихлорэтаноле.

Раствор ТИЦ сушили при комнатной температуре 20°C. В связи с высокой активностью изоцианатов рассчитывали оптимальное

время сушки, во избежание протекания побочных реакций с влагой воздуха.

Для расчета оптимального времени сушки слой грунта, нанесенный на поверхность Ме, взвешивался с шаговым интервалом 5 – 10 мин. На основании полученных данных построен график изменения относительной массы высыхающего раствора ТИЦ от времени сушки (рисунок 1).

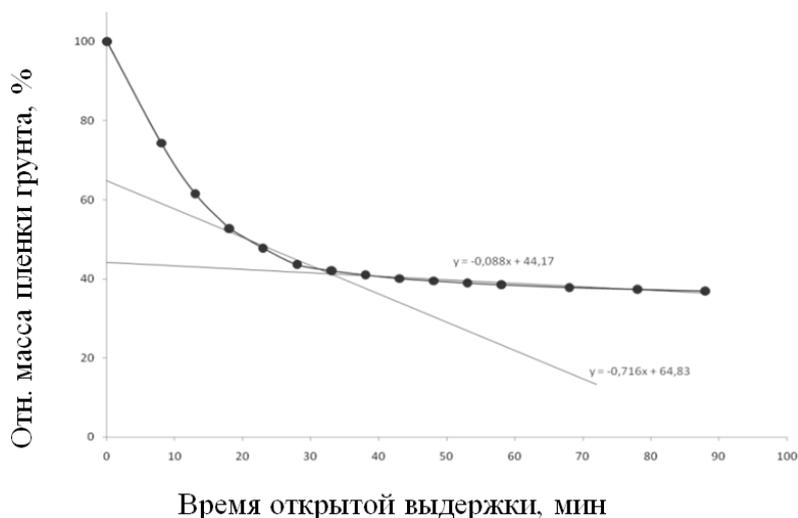


Рисунок 1. Кинетика убыли относительной массы пленки раствора ТИЦ при 20°C

Figure 1. Kinetics of the decrease in the relative mass of the triisocyanate solution film at 20 °C

Установлено, что достаточное время сушки раствора ТИЦ, нанесенного на поверхность кистью, составляло 33 мин.

После нахождения минимального времени сушки раствора ТИЦ, были проведены его

испытания в качестве адгезионного грунта (таблица 3). При испытании клеевой композиции с применением ТИЦ в качестве грунта, прочность при отслаивании существенно возросла, характер разрыва изменился на смешанный когезионно-адгезионный.

Таблица 3. Прочность связи клеевой композиции К1 совместно с раствором ТИЦ в качестве адгезионного грунта

Table 3. Bond strength of the adhesive composition K1 together with triisocyanate solution as an adhesive primer

Протокол испытаний №3 / Test Report No. 3		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: раствор ТИЦ Покровный слой: К1	17,5	Когезионный по резине – 60%; адгезионный на границе сталь/грунт – 40%

При неоднократном воспроизведении опытов наблюдалась нестабильность показателей адгезии. Прочность при отслаивании изменялась от 12 до 20 кН/м. Это явление, вероятно, связано с низкой пленкообразующей способностью ТИЦ, так как трифенилметантриизоцианат сам по себе является вязкой жидкостью, а также с учетом того, что при высушивании ТИЦ часть растворителя остается ассо-

циированной внутри клеевой пленки (см. рисунок 1). Целостность такого покрытия легко можно нарушить при нанесении второго покровного слоя клеевой композиции. В связи с этим, было принято решение модифицировать пленкообразующие свойства грунта, совместив его с полимерной матрицей.

Первым вариантом при таком подходе стало использование в качестве адгезионного

грунта смеси раствора ТИЦ и покровной клеевой композиции К1 в соотношении 1:1. В результате испытаний (таблица 4) достигнуты показатели адгезии сопоставимые с образцами на основе клея хемосил 211/411, также удалось добиться воспроизводимости результатов, при

нанесении свежеприготовленной смеси. Тем не менее, так как клеевая композиция содержит в своем составе фенолформальдегидные смолы, активно реагирующие с изоцианатом, жизнеспособность грунта не превышало 10 мин, что технологически неприемлемо.

Таблица 4. Прочность связи клеевой композиции (К1) совместно со смесью клеевой композиции (К1) и клея на основе ТИЦ в качестве адгезионного грунта

Table 4. Bond strength of the adhesive composition (K1) together with a mixture of the adhesive composition (K1) and triisocyanate based glue as an adhesive primer

Протокол испытаний №4 / Test Report No. 4		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: смесь ТИЦ и К1 в соотношении 1:1 Покровный слой: К1.	20	Когезионный по резине – 95%; адгезионный на границе сталь/грунт – 5%

При дальнейшем подборе полимерной матрицы было решено использовать раствор резиновой смеси на основе полихлоропрена с вулканизирующей группой. В качестве растворителя был выбран тот же растворитель, что

применяется в растворе ТИЦ – дихлорэтан (ДХЭ) во избежание возможности возникновения побочных реакций. Рецепт грунта Гр1 выглядела следующим образом (таблица 5):

Таблица 5. Рецептуры адгезионных грунтов Гр1; Гр2; Гр3

Table 5. Formulation of adhesive primer Gr1; Gr2; Gr3

Рецептура грунта / Soil formulation	Рецептура Гр1 / Recipe Gr1	Рецептура Гр2 / Recipe Gr2	Рецептура Гр3 / Recipe Gr3
	Массовые части / Mass parts		
Полихлоропрен / Polychloroprene	100	100	100
Технический углерод / Carbon black	30	30	30
Оксид цинка / Zinc oxide	4	4	4
Оксид магния / Magnesium oxide	2	2	2
Сера / Sulfur	2	2	2
Дихлорэтан (ДХЭ) / Dichloroethane (DHE)	300	180	-
Метилизобутилкетон (МИК) / Methyl Isobutyl Ketone (MIC)	-	120	300
Раствор ТИЦ (ТФМТИ в ДХЭ) / TIC solution (TFMTI in DHE)	375(75/300)	375(75/300)	375(75/300)
Всего / Total:	813	813	813

Применение грунта Гр1 показало неудовлетворительные результаты (таблица 6). Основной возможной причиной рассматривалась недостаточная продолжительность сушки для испарения высококипящего растворителя.

Также не исключалась возможность того, что надмолекулярные образования полихлоропрена после удаления ДХЭ не способствует максимальному сближению клеевой пленки с поверхностью стали.

Таблица 6. Прочность связи клеевой композиции совместно с грунтом Гр1

Table 6. Bond strength of the adhesive composition together with the Gr1 primer

Протокол испытаний №5 / Test Report No. 5		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: Гр1 Покровный слой: К1	Отс.	Адгезионный на границе сталь/грунт 100%

В связи с выдвинутым предположением о неоптимальном составе растворителей, было решено провести серию испытаний с изменением состава растворителей. Состав растворителей был изменен частичной заменой ДХЭ на метилизобутилкетон (МИК). Между собой

сравнивали составы на одном ДХЭ (Гр1) с увеличенным временем сушки, ДХЭ/МИК в соотношении 80/20 (Гр2) (таблица 5), ДХЭ/МИК в соотношении 50/50 (Гр3) (таблица 5). Испытания проводились с использованием свежеприготовленного грунта (таблица 7, рисунок 2).

Таблица 7. Прочность связи клеевой композиции(К1) совместно с грунтом Гр1; Гр2; Гр3
Table 7. Bond strength of the adhesive composition (K1) together with the primer Gr1; Gr2; Gr3

Протокол испытаний №6 / Test Report No. 6		
Клеевая композиция / Adhesive composition	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: Гр1 (время сушки грунта 1 ч.) Покровный слой: К1	Отс.	Адгезионный на границе сталь/грунт – 100%
Грунт к Ме: Гр2 Покровный слой: К1	9	Когезионный по резине – 40%; адгезионный на границе сталь/грунт – 60%
Грунт к Ме: Гр3 Покровный слой: К1	17	Когезионный по резине – 80%; адгезионный на границе сталь/грунт – 20%

В ходе испытаний обнаружена закономерность увеличения прочности связи при росте доли метилизобутилкетона (рисунок 2).

Также зафиксировано, что увеличение времени сушки грунта Гр1 не привело к улучшению результатов. Вероятнее всего увеличение адгезии с ростом доли МИК связано с изменением надмолекулярной структуры полихлоропрена, которая позволила добиться максимального сближения клеевой пленки с поверхностью субстрата.

Показано, что триизоцианат взаимодействовал при комнатной температуре не только со смолами, но и с полихлоропреном или с его вулканизирующей группой. На возможность взаимодействия полихлоропрена с триизоциана-

тами указывает работа [9]. Также допускается взаимодействие триизоцианата с функциональными группами на поверхности техуглерода. Согласно обзорной статье [10] технический углерод может содержать на своей поверхности гидроксильные и карбоксильные группы, которые способны к взаимодействию с изоцианатами. Зафиксировано, что время жизни грунта обратно пропорционально его клеящей способности (рисунок 3). Если для грунта с дихлорэтаном гелеобразование наступило спустя 21 сутки от момента приготовления раствора, для раствора, содержащего 20% МИК это время составило 7 суток, а для грунта содержащего 50% МИК время начала гелеобразования составило всего 4 суток.

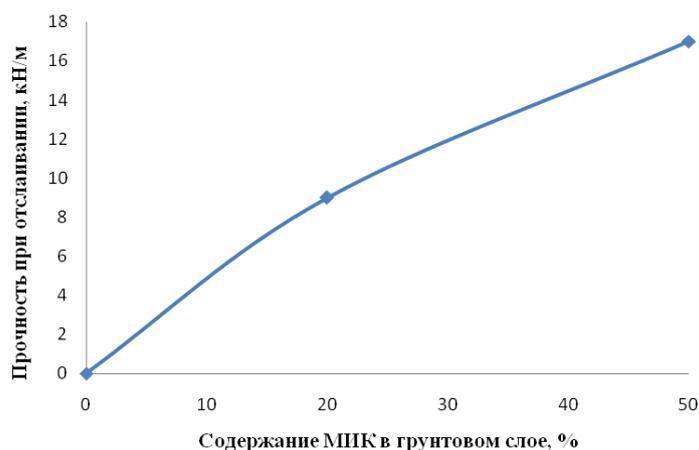


Рисунок 2. Зависимость прочности при отслаивании двухслойного клеевого соединения от соотношения растворителей МИК:ДХЭ в грунте

Figure 2. Dependence of the peeling strength of a two-layer adhesive joint on the ratio of solvents MIBK: EDC in the primer

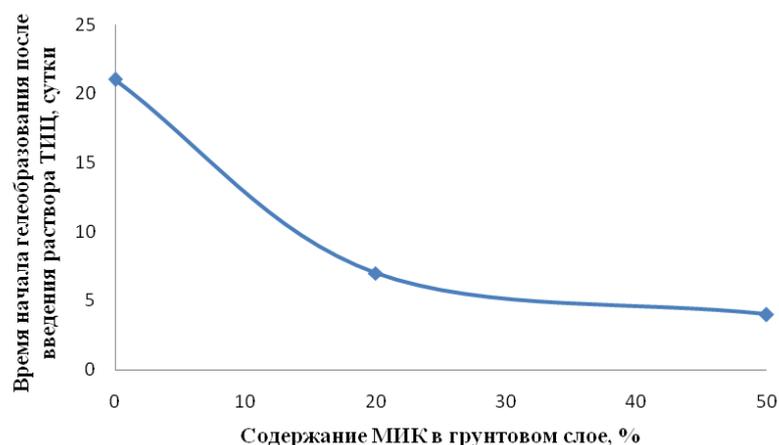


Рисунок 3. Жизнеспособность грунта (гелеобразование) от соотношения растворителей МИК:ДХЭ

Figure 3. Viability of the primer (gelation) from the ratio of solvents MIBK: EDC

Не найдено объяснение, с чем именно связано ускорение гелеобразования. Существуют работы, указывающие на значительное влияние среды на кинетику взаимодействия изоцианатов. Например, скорость реакции изоцианатов со спиртами и фенолами на два порядка выше в растворителях, являющихся слабыми акцепторами водородных связей, чем в растворителях, являющихся сильными акцепторами водородных связей [11]. В данном случае, наблюдалась противоположная картина. Так как механизм этого взаимодействия не ясен, нельзя сделать выводы о специфическом химическом взаимодействии с растворителем.

Весьма вероятно, что ускорение гелеобразования также связано с изменением подвижности макромолекул полихлоропрена. По крайней мере очевидно, что даже при одинаковой скорости образования межмолекулярных связей скорость нарастания вязкости раствора зависит от вида и размера надмолекулярных структур в концентрированном растворе полимера.

Использование раствора резиновой смеси на основе полихлоропрена в качестве полимерной матрицы для грунта не оправдало себя. Поэтому было принято решение применить блокированный изоцианат. Для испытаний было изготовлено 2 состава (таблица 8).

Таблица 8. Рецепттура составов А1 и А2

Table 8. Formulation of compositions A1 and A2

Компоненты, масс. ч. / Components, wt. h.	A1	A2
Раствор ТИЦ / TIC solution	100	100
Фенол / Phenol	10,2	15,3
Метилизобутилкетон / Methyl Isobutyl Ketone	20	20

Приготовление растворов А1 и А2 заключалось в предварительном растворении фенола в метилизобутилкетоне, и введении в раствор фенола раствора ТИЦ в ДХЭ с последующей выдержкой смеси в течение 48 ч, перед применением.

Вероятно, наличие МИК в системе замедляло процесс блокирования триизоцианата [12], однако, по истечению времени выдержки никаких изменений с приготовленными составами не наблюдалось.

Отличие рецептуры А1 от рецептуры А2 заключалось в том, что рецептура А1 содержала 2 моля фенола на один моль триизоцианата, а в рецептуре А2 присутствовало 3 моля фенола на 1 моль триизоцианата. По истечению 48 ч

состав А1 расслоился в нижней части колбы образовалась дисперсия бледно-розового цвета в верхней части находился раствор похожий на раствор ТИЦ. Реактив А2 полностью превратился в дисперсию бледно-розового цвета. Несмотря на это дисперсия не дала практически никаких признаков расслоения на протяжении 1 месяца. Возникновение дисперсии в обоих случаях, объяснялось снижением растворимости образующихся соединений в данной смеси растворителей. Рассматривалось предположение, что образование дисперсии связано со взаимодействием свободной группы - NCO с уретановой группой блокированного изоцианата, что мало вероятно из-за низкой активности уретановой группы. Известно, что

подобные типы связей образуются при синтезе полиуретана в присутствии избытка изоцианатного компонента (аллофанатные связи), но этот процесс активно протекает при температурах выше 120°C [13].

Для испытаний в качестве грунта реактивы A1 и A2 поочередно были смешаны с клеевой композицией K1 в соотношении 1:1. При применении свежеприготовленной смеси, были получены следующие результаты (таблица 9).

Таблица 9. Прочность связи клеевой композиции совместно с грунтом – смесь клеевой композиции K1 и реактива A1 и A2

Table 9. Bond strength of the adhesive composition together with the primer – mixture of adhesive composition K1 and reagent A1 and A2

Протокол испытаний №7 / Test Report No. 7		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: смесь A1 и K1 в соотношении 1:1 Покровный слой: K1	20	Когезионный по резине – 95%; адгезионный на границе сталь/грунт – 5%.
Грунт к Ме: смесь A2 и K1 в соотношении 1:1 Покровный слой: K1	Отс.	Адгезионный на границе сталь/грунт – 100%

Адгезионная активность триизоцианата блокированного двумя молями фенола осталась прежней, а адгезионная активность изоцианата блокированного тремя молями фенола значительно снизилась.

Установлено, что в системе, содержащей 2 моля фенола при смешении с клеем наблюдалось гелеобразование (по истечению 24 ч), что свидетельствует о наличии молекул, содержащих две или три незаблокированные группы изоцианата, при этом, время жизни смеси было значительно увеличено. В системе, содержащей три моля фенола при смешении с каучуковой композицией на протяжении двух недель никаких изменений в консистенции клея не наблюдалось. Предполагалось что продукты полного присоединения более устойчивы, чем продукты двойного присоединения фенола к триизоцианату, вследствие чего в системе с двумя молями фенола образовывалась смесь триизоцианата блокированного тремя молями фенола и свободного триизоцианата. Сохранение реакционной способности реактива A1 окончательно опровергает предположение о возможности химического взаимодействия между блокированным и свободным триизоцианатом.

Снижение адгезии к поверхности стали при применении триизоцианатов связанных с фенолом может быть обусловлено такими факторами, как недостаточная температура деблокировки триизоцианата и появление жидкой фазы выделяющегося фенола.

Относительно недостатка температуры известно, что триизоцианат обладает сравнительно низкой температурой деблокирования.

Так, например, существуют подтверждения, что температура обменного разложения триизоцианата блокированного фенолом при реакции с глицерином для трифенилметантриизоцианата значительно ниже, чем для самых распространенных в промышленности толуидиндиизоцианата и дифенилметандиизоцианата [14].

Не исключается возможность неблагоприятного воздействия фазовых включений выделяющегося фенола.

В литературных источниках не было обнаружено сведений о возможном неблагоприятном воздействии выделяющегося фенола. Блокированные изоцианаты широко применяются для термоотверждения лакокрасочных покрытий на поверхности металлов [15, 16], однако, отверждение лакокрасочных покрытий происходит в открытых системах при повышенной температуре с возможностью отведения выделяющегося фенола. Существуют сведения о применении блокированных фенолом изоцианатов, деблокирование которых происходит в закрытых системах. Например, водно-дисперсионные составы для пропитки текстильного корда, где концентрация изоцианатов очень мала. Также блокированный изоцианат вводится в резиновые смеси для модификации адгезионных и структурных свойств [17, 18]. Причем, добавка блокированного изоцианата и в этом случае составляла не более 2-х м.ч. Таким образом, не удалось найти сведений о применении больших концентраций блокированного фенолом изоцианата в системах закрытого отверждения.

Для проверки предположения о воздействии фенола снижающем адгезию были проведены следующие испытания. В качестве

грунта была использована свежеприготовленная смесь состава А1 и клеевой композиции К1 в соотношениях 1/2; 1/1; 2/1 (таблица 10).

Таблица 10. Прочность связи клеевой композиции совместно с грунтом – смесь клеевой композиции и реактива А1 в различных соотношениях

Table 10. Bond strength of the adhesive composition together with the primer – mixture of the adhesive composition and reagent A1 in various ratios

Протокол испытаний №8 / Test Report No. 8		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: смесь А1 и К1 в соотношении 1:2 Покровный слой: К1	2	Когезионный по резине – 10%; адгезионный на границе сталь/грунт – 90%.
Грунт к Ме: смесь А1 и К1 в соотношении 1:1 Покровный слой: К1	20	Когезионный по резине – 95%; адгезионный на границе сталь/грунт – 5%.
Грунт к Ме: смесь А1 и К1 в соотношении 2:1 Покровный слой: К1	4,5	Когезионный по резине – 10%; адгезионный на границе сталь/грунт – 10%; когезионный по клеевому соединению – 80%

Низкие показатели адгезии при уменьшении доли состава А1 указывали на недостаточное количество триизоцианата. Значительное снижение адгезии при увеличении доли реактива А1 вероятно указывало на воздействие выделяющегося фенола.

Следующим направлением для улучшения адгезии клеевого состава к поверхности стали являлся поиск компонента способного связывать выделяющийся фенол. Для таких компонентов существуют некоторые ограничения. Они не должны быть летучими, при нагревании не должны разлагаться с образованием летучих веществ и при взаимодействии с фенолом не должны выделять летучих веществ. Следовательно, компонент связываю-

щий фенол должен вступать в реакции присоединения с фенолом, либо оказывать на него сорбционное воздействие.

В качестве агента связывающего фенол могут выступать ангидриды карбоновых кислот, но поскольку они обладают большой реакционной активностью их применение нежелательно.

В качестве сорбента для фенола был выбран крахмал. Существуют работы, доказывающие сродство фенола к крахмалу и целлюлозе [19, 20].

При смешении клеевой композиции крахмала и реактива А2 в соотношении 1:1:1 в качестве грунта получен следующий результат (таблица 11).

Таблица 11. Прочность связи клеевой композиции совместно с грунтом – смесь клеевой композиции, реактива А2 и крахмала

Table 11. Bond strength of the adhesive composition together with the primer – mixture of the adhesive composition, reagent A2 and starch

Протокол испытаний №9 / Test Report No. 9		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и крахмала в соотношении 1:1:1 Покровный слой: К1	15	Когезионный по резине – 60%; адгезионный на границе сталь/грунт – 40%.

Адгезия грунта к металлу существенно возросла по следующим причинам.

В результате адсорбции фенола крахмалом, фенол более равномерно распределялся в объеме клеевого соединения и не образовывали отдельной фазы.

Также наличие крахмала, может увеличить плотность шивки клеевой композиции,

что в свою очередь могло повлиять на адгезионные свойства клеевого состава. Известно, что изоцианаты реагируют с гидроксильными группами крахмала с образованием термостойких уретановых связей, в то время как с фенолформальдегидной смолой так же, как и с фенолом они не образуют стабильных соединений при повышенной температуре.

Несмотря на то, что адгезия многократно возросла, характер разрыва неоднородный с четко очерченными границами. Предполагалось, что в процессе сушки ассоциируемые молекулы полихлоропрена вытесняли макромолекулы крахмала, вследствие чего происходило разделение фаз. Также нельзя исключать возможность того, что в процессе сушки разделение фаз происходило между частичками блокированного изоцианата и полимерной матрицей.

Дальнейшее продолжение работы было направлено на повышение совместимости компонентов системы и поиск аналогов крахмала.

Было решено испытать в качестве замены крахмала декстрин, который обладает до-

вольно низкой температурой плавления и в процессе вулканизации образует жидкую фазу, что позволит повысить эффективность поглощения фенола. В то же время жидкая фаза декстрина не должна оказывать негативного воздействия на адгезию, так как расплав декстрина обладает значительно большей вязкостью в отличие от фенола и ему сложнее агломерировать в крупные фазы. Также следует отметить, что декстрин частично сшивается молекулами триизоцианата, что также снижает его способность к образованию крупных фаз.

Проведена серия испытаний со смесью реактива А2 и клеевой композиции К1 в соотношении 1:1 с различным содержанием декстрина (таблица 12).

Таблица 12. Прочность связи клеевой композиции совместно с грунтом – смесь клеевой композиции К1, реактива А2 и декстрина в различных соотношениях

Table 12. Bond strength of the adhesive composition together with the primer – mixture of adhesive composition K1, reagent A2 and dextrin in various ratios

Протокол испытаний №10 / Test Report No. 10		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и декстрина в соотношении 3:3:1 (14% декстрина) Покровный слой: К1	5	Адгезионный на границе сталь/грунт – 90%; когезионный по резине – 10%
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и декстрина в соотношении 2:2:1 (20% декстрина) Покровный слой: К1	14	Когезионный по резине – 60%; адгезионный на границе сталь/грунт – 20%; когезионный по клеевому соединению – 20%
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и декстрина в соотношении 3:3:2 (25% декстрина) Покровный слой: К1	15	Когезионный по резине – 75%; адгезионный на границе сталь/грунт – 10%; когезионный по клеевому соединению – 15%
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и декстрина в соотношении 1:1:1 (33% декстрина) Покровный слой: К1	4	Когезионный по клеевому соединению – 85%; адгезионный на границе сталь/грунт – 15%

Графически зависимость прочности при отслаивании клеевого соединения от содержания декстрина в грунтовом слое выглядело следующим образом (рисунок 4).

Вероятно, снижение адгезии в области меньше 20% содержания декстрина обусловлено неблагоприятным воздействием не связанного фенола, в то время как снижение адгезии в области содержания декстрина больше 25% обусловлено неблагоприятным воздействием расплава декстрина. Оптимум находился в области содержания декстрина от 20 до 25

% (что соответствовало соотношению фенол /декстрин в интервале 2/9 – 2/12).

Главным отличием образцов клеевых соединений содержащих декстрин от соединений, содержащих крахмал являлось однородность характера разрушения клеевого соединения. Даже для образцов с 10% когезионного характера разрушения по резине, эластомерный субстрат был равномерно распределен по поверхности стали в виде небольших островков.

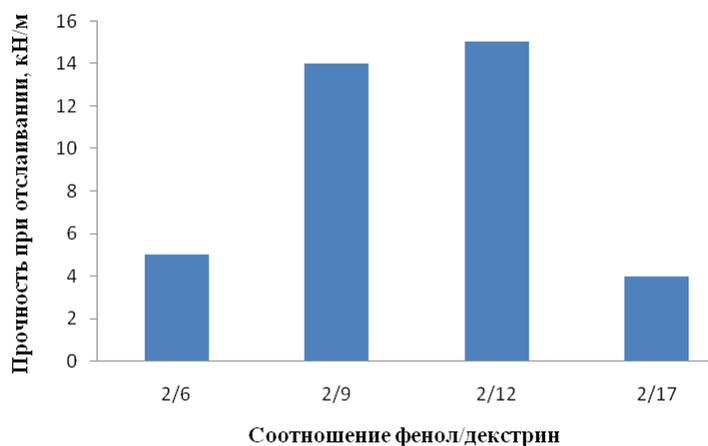


Рисунок 4 – Зависимость прочности связи при отслаивании двухслойного клеевого соединения от соотношения фенол : декстрин в грунте

4 – Dependence of bond strength during peeling of a two-layer adhesive joint on the phenol : dextrin ratio in the primer

Для более корректного сравнения эффективности декстрина по сравнению с крахмалом были проведены испытания, где стандартная резиновая смесь, заменена на резиновую смесь серийного производственного состава, вулканизат которой отличался меньшей прочностью и модулем. Известно, что прочность связи при отслаивании, это условная

величина, ничего не говорящая о реальной площади разрушения клеевого соединения, а установить величину деформируемого объема, в котором локализуется напряжение, не представлялось возможным [21]. Предполагалось, что применение менее жесткой резины увеличит площадь распределения нагрузки при отслаивании (таблица 13).

Таблица 13. Прочность связи клеевой композиции совместно с грунтом – смесь клеевой композиции, реактива А2 и крахмала или декстрина (промышленная резиновая смесь)

Table 13. Bond strength of the adhesive composition together with the primer – mixture of the adhesive composition, reagent A2 and starch or dextrin (industrial rubber compound)

Протокол испытаний №11 / Test Report No. 11		
Клеевое соединение / Adhesive connection	Прочность при отслаивании, кН/м / Peel strength, kN/m	Характер разрушения клеевого соединения / The nature of the destruction of the adhesive joint
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и крахмала в соотношении 1:1:1 Покровный слой: К1	7	Когезионный по резине – 65%; адгезионный на границе сталь/грунт – 35%
Грунт к Ме: смесь А2, К1 и декстрина в соотношении 3:3:2 (25% декстрина) Покровный слой: К1	12	Когезионный по резине – 100%

Как видно из проведенных экспериментов клеевое соединение с декстрином позволяло обеспечить более равномерную адгезию.

Выводы

В связи с изученными показателями химической активности триизоцианата, экспериментально определено минимальное время сушки адгезионного грунта на основе триизоцианата растворенного в дихлорэтано. Обнаружено, что низкая пленкообразующая способность трифенилметантриизоцианата, является серьезной технологической проблемой при его применении в качестве грунта для двухслойных клеевых композиций. Рассмотрены

возможные пути модификации пленкообразующих свойств трифенилметантриизоцианата. Показана зависимость скорости гелеобразования и адгезионных свойств раствора клеевой смеси на основе полихлоропроена от соотношения растворителей при введении в раствор триизоцианата. При применении блокированного фенолом триизоцианата в клеях для горячего крепления резины к металлу, обнаружено неблагоприятное воздействие фенола. Рассмотрены также подходы для сглаживания проблемы присутствия избыточных количеств фенола, такие как введение, в грунт крахмала или декстрина, позволившие добиться однозначного улучшения клеящей способности.

Литература

1. Исследование влияния различных реагентов на каучуковые адгезивы с повышенной теплоустойчивостью / А. В. Чернов, А. Е. Заикин, Н. Н. Никитина, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2003. – № 2. – С. 340-344.
2. The experience of application of isocyanates in glue compositions / A. Puchkov, N. Tret'yakova, S. Khodakova, I. Abol'skaya // *Polymer Science Series*. – 2016. – № 9. – P. 267-269.
3. Патент № 2785566 Российская Федерация, МПК C08G 18/18, C08G 18/54, C08G 18/76, C08G 8/10. Связующее на основе фенольной смолы с пониженным содержанием формальдегида: № 2020119962: заявл. 11.01.2019: опубл. 08.12.2022 / Прибе Кристиан – 25 с.
4. Патент № 2755302 Российская Федерация, МПК C08G 18/10, C08G 18/76, C08G 18/42, C08G 18/48, C09J 175/04, C09J 175/06, C09J 175/08. Двухкомпонентная адгезивная композиция и способ ее изготовления : № 2019103552 : заявл. 22.05.2017 : опубл. 15.09.2021 / Се Жуй – 22 с.
5. Патент № 2266943 Российская Федерация, МПК C 09 J 175/2, 111/0. Клеевая композиция для крепления резин к металлу при вулканизации : № 2004128107/04 : заявл. 21.09.2004 : опубл. 27.12.2005 / Оганджян Б. Г., Варданян Ц.Х., Молоканова Л.А., Маргарян Д.В. – 6 с.
6. Патент № 2230765 Российская Федерация, МПК C 09 J 175/00. Клеевая композиция : № 2003113012/04 : заявл. 07.05.2003 : опубл. 20.06.2004 / Каблов Е.Н., Минаков В.Т., Аниховская Л.И., Иванова Р.И., Васильченко О.Л., Тюменева Т.Ю. – 4 с.
7. Патент № 2471842 Российская Федерация, МПК C09J 175/00. Клеевая композиция : № 2011118707/05 : заявл. 11.05.2011 : опубл. 10.01.2013 / Каблов Е.Н., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю., Шаромова Э.И., Когтенков А.С., Савосина И.Ю. – 6 с.
8. Патент № 2699138 Российская Федерация, МПК C09J 109/00, C09J 175/00, C08J 5/12. Адгезив для крепления резин к металлу при вулканизации : № 2019100731 : заявл. 10.01.2019 : опубл. 03.09.2019 / Третьякова Н.А., Абольская И.И., Бобров С.П. – 7 с.
9. Hoehne, K. The Curing of Polychloroprene Coating Materials with Polyisocyanates / K. Hoehne // *Rubber Chemistry and Technology*. – 1969. – № 42(2). – P. 394-403.
10. Robertson, C.G. Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber: Perspective on the Original Polymer Nanocomposite / C.G. Robertson, N.J. Hardman // *Polymers*. – 2021. – № 13(4). – P. 538.
11. Wicks, Douglas A. Blocked isocyanates III: Part A. Mechanisms and chemistry / Douglas A. Wicks, Zeno W. Wicks // *Progress in Organic Coatings*. – 1999. – № 36(3). – P. 148-172.
12. Бадамшина, Э. Р. Уретаны как скрытые изоцианаты: кинетика и механизм обменных реакций с протонодонорными соединениями / Э. Р. Бадамшина, М. П. Гафурова // *Высокомолекулярные соединения. Серия С*. – 2002. – Т. 44, № 9. – С. 1643-1659.
13. Влияние условий образования сетчатого полиуретана на степень сшивания и механические свойства / Е. С. Афанасьев, М. Д. Петунова, Л. М. Голенева [и др.] // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. – 2010. – Т. 52, № 12. – С. 2131-2139.
14. Саундерс, Дж.Х. Химия полиуретанов [Текст] / Д. Х. Саундерс, К. К. Фриш – М.: Химия, 1968 – 472 с.
15. Определение наиболее эффективного катализатора и блокирующего агента для изоцианатов / Ю. В. Чурилов, Л. И. Лазарева, Д. Р. Новикова [и др.] // *Полимеры в стратегии научно-технического развития РФ "Полимеры-2020": Сборник тезисов Восьмой Всероссийской Каргинской конференции, Москва, 09–13 ноября 2020 года*. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «МЕСОЛ», 2020. – С. 554.
16. Wicks, Douglas A. Blocked isocyanates III: Part B: Uses and applications of blocked isocyanates / Douglas A. Wicks, Zeno W. Wicks // *Progress in Organic Coatings*. – 2001. – № 41(1-3). – P. 1-83.
17. Афлятунова, А. Ф. Исследование свойств резин с добавками на основе блокированных изоцианатов / А. Ф. Афлятунова // *Наука. Наследие. Университет : Сборник материалов Международной 56-й научной студенческой конференции. Посвящается Году культурного наследия народов Российской Федерации, Году выдающихся земляков в Чувашской Республике, Чебоксары, 08–15 апреля 2022 года*. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2022. – С. 342-344.
18. Швецова, К. В. Сравнительная характеристика адгезионных модификаторов в составе резин для обрезинки полиамидного корда / К. В. Швецова, Т. В. Писаревская // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2011. – № 6. – С. 92-97.
19. Воронова, М. И. Адсорбция фенола и толуола из газовой фазы и водных растворов на целлюлозе / М. И. Воронова, Ф. Г. Захаров // *Журнал прикладной химии*. – 2009. – Т. 82, № 3. – С. 410-413.

20. Дацкевич, Е. В. Удаление фенолов из воды композициями сшитого крахмала / Е. В. Дацкевич // Журнал прикладной химии. – 2009. – Т. 82, № 12. – С. 2057-2064.
21. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров [Текст] / А. А. Берлин, В. Е. Басин – М.: Химия, 1969 – 320 с.

References

1. Investigation of the effect of various reagents on rubber adhesives with increased heat resistance / A.V. Chernov, A. E. Zaikin, N. N. Nikitina, O. V. Stoyanov // Bulletin of Kazan Technological University. - 2003. – No. 2. – pp. 340-344.
2. The experience of application of isocyanates in glue compositions / A. Puchkov, N. Tret'yakova, S. Khodakova, I. Abol'skaya // Polymer Science Series. – 2016. – № 9. – pp. 267-269.
3. Patent No. 2785566 Russian Federation, IPC C08G 18/18, C08G 18/54, C08G 18/76, C08G 8/10. A binder based on phenolic resin with a reduced formaldehyde content: No. 2020119962: application 11.01.2019: published 08.12.2022 / Priebus Christian – 25 p.
4. Patent No. 2755302 Russian Federation, IPC C08G 18/10, C08G 18/76, C08G 18/42, C08G 18/48, C09J 175/04, C09J 175/06, C09J 175/08. Two-component adhesive composition and method of its manufacture : No. 2019103552 : application no. 22.05.2017 : publ. 15.09.2021 / Xie Rui - 22 p.
5. Patent No. 2266943 Russian Federation, IPC C 09 J 175/2, 111/0. Adhesive composition for fixing rubbers to metal during vulcanization : No. 2004128107/04 : application 21.09.2004 : published 27.12.2005 / Oganjanyan B. G., Vardanyan C.H., Molokanova L.A., Margaryan D.V. – 6 p.
6. Patent No. 2230765 Russian Federation, IPC C 09 J 175/00. Adhesive composition : No. 2003113012/04 : application No. 07.05.2003 : published on 20.06.2004 / Kablov E.N., Minakov V.T., Anikhovskaya L.I., Ivanova R.I., Vasilchenko O.L., Tyumeneva T.Yu. – 4 p.
7. Patent No. 2471842 Russian Federation, IPC C09J 175/00. Adhesive composition : No. 2011118707/05 : application. 05/11/2011 : published. 01/10/2013 / Kablov E.N., Lukina N.F., Tyumeneva T.Yu., Sharomova E.I., Kogtenkov A.S., Savosina I.Yu. – 6 p.
8. Patent No. 2699138 Russian Federation, IPC C09J 109/00, C09J 175/00, C08J 5/12. Adhesive for fixing rubbers to metal during vulcanization : No. 2019100731 : application 10.01.2019 : published 03.09.2019 / Tret'yakova N.A., Abolskaya I.I., Bobrov S.P. – 7 p.
9. Hoehne, K. The Curing of Polychloroprene Coating Materials with Polyisocyanates / K. Hoehne // Rubber Chemistry and Technology. – 1969. – № 42(2). – pp. 394-403.
10. Robertson, C.G. Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber: Perspective on the Original Polymer Nanocomposite / C.G. Robertson, N.J. Hardman // Polymers. – 2021. – № 13(4). – P. 538.
11. Wicks, Douglas A. Blocked isocyanates III: Part A. Mechanisms and chemistry / Douglas A. Wicks, Zeno W. Wicks // Progress in Organic Coatings. – 1999. – № 36(3). – P. 148-172.
12. Badamshina, E. R. Urethanes as hidden isocyanates: kinetics and mechanism of exchange reactions with proton-donating compounds / E. R. Badamshina, M. P. Gafurova // High molecular weight compounds. Series C. – 2002. – Vol. 44, No. 9. – pp. 1643-1659.
13. The influence of the conditions of formation of mesh polyurethane on the degree of crosslinking and mechanical properties / E. S. Afanasyev, M. D. Petunova, L. M. Goleneva [et al.] // High molecular weight compounds. Series A. – 2010. – Vol. 52, No. 12. – pp. 2131-2139.
14. Saunders J. H. Chemistry of polyurethanes / J. H. Saunders, K. K. Frisch-Moscow: Khimiya, 1968-472 p.
15. Determination of the most effective catalyst and blocking agent for isocyanates / Yu.V. Churilov, L. I. Lazareva, D. R. Novikova [et al.] // Polymers in the strategy of scientific and technical development of the Russian Federation "Polymers 2020": Collection of abstracts of the Eighth All-Russian Kargin Conference, Moscow, November 09-13, 2020. Moscow: MESOL Limited Liability Company, 2020, p. 554.
16. Wicks, Douglas A. Blocked isocyanates III: Part B: Uses and applications of blocked isocyanates / Douglas A. Wicks, Zeno W. Wicks // Progress in Organic Coatings. – 2001. – № 41(1-3). – P. 1-83.
17. Aflyatunova, A. F. Investigation of the properties of rubbers with additives based on blocked isocyanates / A. F. Aflyatunova // Science. Heritage. University : Collection of materials of the 56th International Scientific Student Conference. Dedicated to the Year of Cultural Heritage of the Peoples of the Russian Federation, the Year of Outstanding Countrymen in the Chuvash Republic, Cheboksary, April 08-15, 2022. Cheboksary: I.N. Ulyanov Chuvash State University, 2022, pp. 342-344.
18. Shvetsova, K. V. Comparative characteristics of adhesive modifiers in the composition of rubbers for trimming polyamide cord / K. V. Shvetsova, T. V. Pisarevskaya // Issues of chemistry and chemical technology. – 2011. – No. 6. – pp. 92-97.

19. Voronova, M. I. Adsorption of phenol and toluene from the gas phase and aqueous solutions on cellulose / M. I. Voronova, F. G. Zakharov // *Journal of Applied Chemistry*. – 2009. – Vol. 82, No. 3. – pp. 410-413.

20. Datskevich, E. V. Removal of phenols from water by compositions of crosslinked starch / E. V. Datskevich // *Journal of Applied Chemistry*. - 2009. – Vol. 82, No. 12. – pp. 2057-2064.

21. Berlin, A. A. Fundamentals of polymer adhesion / A. A. Berlin, V. E. Basin – M.: Chemistry, 1969 – 320 p.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, 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
Крюков Владимир Андреевич	студент-магистр, Воронежский государственный университет инженерных технологий, магистр кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, kryukovvladimir1602@gmail.com
Дыбова Дарья Романовна	студент-магистр, Воронежский государственный университет инженерных технологий, магистр кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, ddr.bvbarmy01@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)
Sedykh Valery Alexandrovich	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
Kryukov Vladimir Andreevich	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, kryukovvladimir1602@gmail.com
Dybova Darya Romanovna	master's student, Voronezh state university of engineering technologies, master of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, ddr.bvbarmy01@gmail.com

статья поступила в редакцию
08.04.2025

одобрена после рецензирования
28.04.2025

принята к публикации
12.05.2025

the article was submitted
08.04.2025

approved after reviewing
28.04.2025

accepted for publication
12.05.2025

РАСЧЕТ СТЕПЕНИ ЗАВЕРШЁННОСТИ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МНОГОСЛОЙНЫХ РЕЗИНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Сергей Германович Тихомиров	1	tikhomirov_57@mail.ru
Александр Александрович Маслов✉	1	imasslove@mail.ru
Ольга Викторовна Карманова	1	karolga@mail.ru
Ольга Алексеевна Другова	1	Olia.drugova2016@yandex.ru
Максим Николаевич Мысливец	2	m.n.myslivets@gmail.com
Мария Вячеславовна Донгаева	2	marydongalia@gmail.com

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

²ООО "ЭМИРП", домовладение 4, Корпус Г, под. 18, эт. 7, оф. 722, поселение Московский, 22 км Киевского ш., г. Москва, 108811, Россия

Аннотация. В статье описаны основные методы определения оптимальных условий вулканизации резинокордных композитов. Представлен расчет температурно-временного режима процесса вулканизации на примере многослойного резинового изделия, применяемого в качестве резинометаллических опор. Расчет основан на методике, учитывающей температурные поля в изделии и построение на их основе степени завершенности процесса. Для определенного состава получены реометрические кривые при разных температурных режимах, по которым рассчитаны параметры модели кинетики неизотермической вулканизации. В результате предложены варианты температурно-временного режима проведения процесса с целью минимизации потерь на производстве многослойных резино-технических изделий, применяемых в тяжелой промышленности.

Ключевые слова: программный комплекс, время вулканизации, оптимум, температура процесса, структурирование, вулканизат, оптимальный режим.

Для цитирования: Тихомиров С. Г., Маслов А. А., Карманова О. В., Другова О. А., Мысливец М. Н., Донгаева М. В. Расчет степени завершенности процесса вулканизации на примере многослойных резиновых изделий для тяжелой промышленности // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 69-79.

Original article

CALCULATION OF THE DEGREE OF COMPLETION OF THE VULCANIZATION PROCESS USING THE EXAMPLE OF MULTILAYER RUBBER PRODUCTS FOR HEAVY INDUSTRY

Sergey G. Tikhomirov	1	tikhomirov_57@mail.ru
Alexander A. Maslov ✉	1	imasslove@mail.ru
Olga V. Karmanova	1	karolga@mail.ru
Olga A. Drugova	1	Olia.drugova2016@yandex.ru
Maxim N. Myslivets	2	m.n.myslivets@gmail.com
Maria V. Dongaeva	2	marydongalia@gmail.com

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

²ООО "EMIRP", build. 4, block G, entrance 18, 7th floor, office 722, Moskovsky settlement, 22 km of Kievskoye highway, Moscow, 108811, Russia

Abstract. The article describes the main methods for determining the optimal vulcanization conditions for rubber-cord composites. The calculation of the temperature-time regime of the vulcanization process is presented using the example of a multilayer rubber product used as rubber-metal supports. The calculation is based on a technique that takes into account the temperature fields in the product and the construction of the degree of completion of the process based on them. For a certain composition, geometric curves were obtained at different temperature conditions, from which the parameters of the model of the kinetics of nonisothermal vulcanization were calculated. As a result, variants of the temperature and time regime of the process are proposed in order to minimize losses in the production of multilayer rubber products used in heavy industry.

Keywords: software package, vulcanization time, optimum, process temperature, structuring, vulcanization, optimal model.

For citation: Tikhomirov S. G., Maslov A. A., Karmanova O. V., O. A. Drugova O. A., Myslivets M. N., Dongaeva M. V. Calculation of the degree of completion of the vulcanization process using the example of multilayer rubber products for heavy industry. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 69-79. (In Russ.).

Введение

Процесс вулканизации является ключевым этапом в производстве резиновых изделий, определяющим их физико-механические свойства, такие как прочность, эластичность и устойчивость к внешним воздействиям. Для тяжелой промышленности, где применяются многослойные резиновые изделия, такие как транспортерные и конвейерные ленты, резиновые покрытия, уплотнители и амортизирующие элементы, важна высокая степень надежности, соответствие строгим требованиям по прочности, устойчивости к внешним воздействиям и долговечности изготавливаемой продукции.

Оптимизация процесса вулканизации оказывает значительное влияние на различные аспекты производства резиновых изделий, такие как: улучшение качества и надежности производимых резиновых изделий, повышение экономической эффективности, поддержка экологической составляющей производства, а так же развитие технологического прогресса.

В современном производстве актуальной задачей является точный расчет степени завершенности процесса вулканизации, позволяющий контролировать качество продукции и минимизировать производственные потери из-за некондиционных изделий. Это особенно важно для многослойных изделий, где необходимо учитывать сложные тепловые и химические процессы, происходящие в эластомерном материале. Недостаточная или избыточная вулканизация может привести к ухудшению эксплуатационных характеристик и выходу изделия из строя, что недопустимо в условиях тяжелой промышленности.

Сложность задачи обусловлена многослойной структурой изделий, неоднородностью теплопередачи, а также зависимостью кинетики вулканизации от множества факторов, включая температуру, давление и состав резиновой смеси.

Актуальность исследования

Для решения подобных задач широко применяется математическое моделирование на базе натурных экспериментов, позволяющее прогнозировать поведение материала в процессе структурирования. Инженеры-технологи и исследователи используют модели, основанные на уравнениях кинетики химических реакций, теплопередачи и механики деформируемых тел, чтобы оптимизировать параметры процесса [1].

Современные подходы включают численные методы, такие как метод конечных элементов, а также программные комплексы такие как

ANSYS и COMSOL [2], которые обеспечивают высокую точность расчетов. Однако разработка универсальных моделей, учитывающих все аспекты многослойных систем, остается сложной задачей, требующей дальнейших исследований.

Исследования в этой области имеют практическую значимость для широкого круга отраслей тяжелой промышленности, таких как машиностроение, горнодобывающая и металлургическая отрасли, где надежность резиновых изделий напрямую влияет на эффективность производственных процессов.

Актуальные работы [3-5] включают создание адаптивных систем управления режимами вулканизации, использование экологически безопасных материалов и оптимизацию процессов для многослойных резиновых изделий. Авторы исследований [6-9] по оптимизации процесса вулканизации предлагают разнообразные подходы, направленные на обеспечение максимального качества продукции при минимальных затратах. Методы зависят от особенностей изделия, применяемых материалов и оборудования. Основные подходы включают теоретическое моделирование, экспериментальные методы и современные цифровые технологии.

Анализ методов определения оптимальных условий вулканизации

Оптимизация вулканизации - это многомерная задача, требующая точной и часто специфичной для конкретного применения адаптивного регулирования температуры, времени и давления. Эти параметры по своей сути взаимосвязаны, и их синергетический эффект определяет окончательные характеристики резинового изделия. Изменение одного параметра без учета его влияния на другие может привести к субоптимальным результатам. Например, простое повышение температуры для сокращения времени вулканизации может привести к перевулканизации или значительно снизить срок эксплуатации резинометаллического изделия. Поэтому для установления идеальной комбинации этих фундаментальных параметров необходимо всестороннее понимание поведения резиновой смеси в различных условиях и желаемых показателей производительности [3].

Определение оптимальных условий вулканизации резины является важнейшим аспектом технологии резины, влияющим на конечные свойства и эксплуатационные характеристики резиновых изделий [10]. Для этой цели используются различные методы, каждый из которых имеет свой набор принципов, преимуществ и недостатков.

Так, реометрия является краеугольным методом анализа вулканизации резиновых смесей, обеспечивая динамический профиль процесса вулканизации путем мониторинга эволюции вязкоупругих свойств материала. Параметры, полученные из кривых реометрии, служат критическими показателями для оптимизации циклов вулканизации с целью достижения желаемой плотности сшивания и прогнозирования технологичности и конечных эксплуатационных характеристик резиновых изделий [3]. Непрерывное измерение крутящего момента во время вулканизации позволяет детально понять кинетику реакции, включая начало вулканизации, скорость образования поперечных связей и достижение оптимальной степени вулканизации каучука [11]. Эта информация необходима для регулировки технологических параметров, таких как температура и время, для обеспечения эффективного и последовательного производства высококачественных резиновых изделий.

Следующий метод - дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Это термоаналитический метод, который измеряет тепловой поток в образец резины или из него как функцию температуры или времени. Во время вулканизации, которая является экзотермическим процессом, с помощью ДСК можно обнаруживать и количественно определять тепло, выделяемое при образовании поперечных связей [12]. ДСК является методом термического анализа материалов, определяющим изменения в удельной теплоемкости и энтальпии во время фазовых переходов или химических реакций, включая процесс вулканизации эластомеров. ДСК измеряет мгновенное тепло от реакционноспособного образца как функцию температуры, что используется для изучения скорости вулканизации по теплоте реакции [4]. ДСК служит ценным инструментом для выяснения теплового поведения и кинетики реакции вулканизации резины. Количественно определяя тепловой поток, связанный с процессом сшивания, ДСК позволяет исследователям и производителям оптимизировать температуры вулканизации, определять энергии активации и глубже понимать термодинамические аспекты, регулирующие образование резиновой сетки. Тепло, выделяющееся во время вулканизации прямо пропорционально глубине протекания химической реакции. Способность ДСК точно измерять это тепло позволяет строить кинетические модели, которые могут прогнозировать скорость вулканизации при различных температурных условиях. Эта информация имеет решающее значение для разработки эффективных и ре-

зультативных циклов вулканизации, которые минимизируют потребление энергии и обеспечивают оптимальное качество продукции.

Испытания механических свойств предоставляют наиболее прямые доказательства того, привела ли вулканизация к получению резинового материала, пригодного для его предполагаемого использования [13]. Определяя ключевые показатели эксплуатационных свойств, такие как прочность, эластичность и долговечность, данные испытания гарантируют, что оптимизированные условия вулканизации приводят к продукту, отвечающему необходимым техническим требованиям [5]. Реометрия и ДСК предоставляют важные данные о кинетике и термодинамике процесса вулканизации, но ключевым критерием его эффективности остаются механические характеристики полученного резино-технического изделия. Механические испытания служат контрольным этапом, позволяющим верифицировать соответствие параметров вулканизации заданным макроскопическим свойствам, которые обеспечивают функциональную пригодность резинового изделия в условиях эксплуатации.

Методы компьютерного моделирования стали мощным и экономически эффективным подходом к оптимизации процессов вулканизации резины, особенно для изделий со сложными геометрическими особенностями и требуемыми эксплуатационными характеристиками. Рассчитывая теплопередачу и кинетику реакций, эти инструменты позволяют производителям прогнозировать поведение при вулканизации, определять оптимальные параметры процесса и в конечном итоге производить высококачественные резиновые изделия с повышенной эффективностью при снижении брака в производстве изделий и отходов [7]. Математическое моделирование процесса вулканизации позволяет исследовать различные условия обработки и составы материалов без необходимости проведения экспериментов. Это значительно сокращает время и затраты, связанные с оптимизацией процесса, и обеспечивает более глубокое понимание факторов, влияющих на конечные свойства резинового изделия. Кроме того, компьютерное моделирование позволяет идентифицировать и минимизировать потенциальные технологические дефекты, включая неравномерность вулканизации и локальный перегрев, что способствует интенсификации и обеспечению надежности производственного процесса.

Выбор наиболее подходящего метода определения оптимальных условий вулканизации зависит от конкретных требований,

применения имеющихся ресурсов и желаемого уровня информации [14]. Часто комбинация методов исследования и математического прогнозирования обеспечивает наиболее полное понимание и позволяет эффективно оптимизировать процесс. Каждый метод предлагает уникальные преимущества и ограничения. Например, реометрия предоставляет данные в режиме реального времени о процессе вулканизации, но предлагает косвенную оценку конечных свойств. Механические испытания напрямую оценивают эксплуатационные характеристики вулканизированного продукта, но, как правило, являются разрушающими. ДСК предоставляет информацию о термодинамических и кинетических характеристиках, но может не коррелировать с механическими свойствами. Испытания на набухание дают представление о плотности сшивания, но могут быть длительными. Спектроскопические методы дают подробную информацию о химическом строении, но требуют специальных знаний и оборудования. Моделирование предлагает возможности прогнозирования, но опирается на точные параметры модели. Следовательно, стратегическая комбинация этих методов, адаптированная к конкретным целям анализа, часто является наиболее эффективным подходом к всестороннему определению оптимальных условий вулканизации.

Материал и методы исследования

Для решения производственных задач по изготовлению резинотехнических изделий, применяемых в тяжелой промышленности, таких как резиновые и резинометаллические амортизаторы в качестве примера исследуется состав резиновой смеси марки ИРП-1347 (рисунок 1). Смесь применяется и предназначена для изготовления резинометаллических и резиновых амортизаторов, работающих в среде воздуха, воды, слабых растворов кислот и щелочей (кроме азотной и уксусной).

Используя разработанные программные продукты и методику расчета степени завершенности процесса вулканизации, описанные в работах [1], [3], [4], проведено исследование для оценки температурно-временного режима этапа вулканизации модельного изделия.

Методика заключается в следующем: на первом этапе необходимо определить начальные концентрации компонентов применяемой резины, затем используя технические справочники необходимо определить теплофизические характеристики всех компонентов резиновой смеси, а также металлических слоев для расче-

тов температурных полей в изделии. Для исходного состава резиновой смеси снимаются реометрические кривые при разных температурах для оценки параметров математической модели кинетики вулканизации. С помощью специального программного обеспечения (ПО) проводится идентификация параметров модели неизотермической вулканизации. На финальном этапе проводится расчет температурного поля в изделии определенного состава и на основании температур проводится расчет степени завершенности процесса в каждой точке изделия.

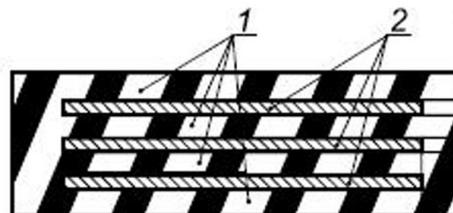


Рисунок 1. Схема исследуемого многослойного резинового изделия, 1 – резиновый слой, 2 – промежуточные стальные листы

Figure 1. Diagram of a multilayer rubber product, 1 is the rubber layer, 2 – intermediate steel sheets

Начальная концентрация действительного агента вулканизации (ДАВ) рассчитывается согласно рецептурному составу (таблица 1) по формуле (1) и переводится из массовых частей в размерность моль/кг:

$$[ДАВ] = ksi * [S] * [Ac] * [Akt]^{tet} * [R]^{et} \quad (1)$$

где ksi, tet, et – коэффициенты, определяемые в результате идентификации параметров математической модели; [S] – концентрация серы, моль/кг; [Ac] – концентрация ускорителя вулканизации, моль/кг; [Akt] – концентрация активатора вулканизации, моль/кг; [R] – концентрация каучука, моль/кг.

Процесс идентификации параметров модели кинетики реализуется в результате выполнения следующей последовательности действий: на первом этапе обработка реограмм, полученных при температурах 130°C, 140°C и 150°C.

Таблица 1. Состав резиновой смеси

Table 1. Composition of rubber compound

Наименование компонента / Component name	Содержание, мас.ч. / Content, wt.h.
R (каучук)	64,52
S (сера)	1,29
Ac (Сульфенамид Ц)	0,64
Akt (оксид цинка)	9,68

Проводится идентификация параметров модели неізотермической вулканизации путем минимизации функционала (2)-(3):

$$\Phi(k_1, k_2, \dots, k_9, \{\text{stehio}\}) = \int_0^{t_k} q^2(k_1, k_2, \dots, k_9, \{\text{stehio}\}) dt \quad (2)$$

$$q(k_1, k_2, \dots, k_9, \{\text{stehio}\}) = \frac{R(M(t) - M_{\min})}{M_{\max} - M_{\min}} - C_{\text{vust}} \quad (3)$$

где M_{\min} , M_{\max} – минимальное и максимальное значение крутящего момента - $M(t)$, показателя на реометрической кривой, соответственно, R – коэффициент перевода из крутящего момента в показатели концентрации, $\{\text{stehio}\} = \alpha, \beta, \gamma, \delta, \text{dzet}, \text{tet}, \text{et}$ – набор стехиометрических коэффициентов, k_1, k_2, \dots, k_9 – константы скоростей химических реакций разных стадий вулканизации [16].

Математическая модель кинетики неізотермической вулканизации представлена системой дифференциальных уравнений, с заданными начальными условиями – начальными концентрациями компонентов резиновой смеси (4). В этой системе обозначены: C_A – концентрация ДАВ; C_B – концентрация предшественника сшивания; C_{B^*} – концентрация активной формы предшественника сшивания; C_{vusi} – концентрация стабильных вулканизационных узлов; C_{vulab} – концентрация лабильных вулканизационных узлов; C_C – концентрация внутримолекулярно связанной серы; C_{R^*} – концентрация макрорадикала каучука; C_R – концентрация каучука; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – стехиометрические коэффициенты; k_1, \dots, k_9 – константы скоростей реакции.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_A}{dt} = -k_1 \cdot C_A - k_4 \cdot C_A \cdot C_{B^*} \\ \frac{dC_B}{dt} = k_1 \cdot C_A - k_2 \cdot C_B + \beta \cdot k_4 \cdot C_A \cdot C_{B^*} + k_9 \cdot C_{R^*} \\ \frac{dC_{B^*}}{dt} = k_2 \cdot C_B - (k_3 + k_5 + k_7) \cdot C_{B^*} + k_6 \cdot C_{\text{vulab}} - k_4 \cdot C_A \cdot C_{B^*} \\ \frac{dC_{\text{vusi}}}{dt} = \alpha \cdot k_3 \cdot C_{B^*} \\ \frac{dC_{\text{vulab}}}{dt} = \gamma \cdot k_5 \cdot C_{B^*} - k_6 \cdot C_{\text{vulab}} \\ \frac{dC_C}{dt} = \delta \cdot k_7 \cdot C_{B^*} \\ \frac{dC_{R^*}}{dt} = k_8 \cdot C_R - k_9 \cdot C_{R^*} \\ \frac{dC_R}{dt} = -k_8 \cdot C_R \\ C_A(0) = [\text{ДАВ}] \\ C_B(0) = 0 \\ C_{B^*}(0) = 0 \\ C_{\text{vusi}}(0) = 0 \\ C_{\text{vulab}}(0) = 0 \\ C_C(0) = 0 \\ C_{R^*}(0) = C_R(0) \end{array} \right. \quad (4)$$

Константы скоростей реакций рассчитываются на основании уравнения Аррениуса (5), в которых определяются предэкспоненциальные множители и энергии активаций по каждой из реакций (таблица 3):

$$k_i(T) = k_{0i} \cdot \exp(-E_i / (R \cdot T)), \text{ при } i=1 \dots 9 \quad (5)$$

Алгоритм идентификации констант реализован в специализированном ПО [15]. После всех расчетов проводится анализ полученных результатов.

Получены экспериментальные реометрические зависимости исследуемого эластомерного материала для расчета параметров математической модели кинетики неізотермической вулканизации. Экспериментальные реометрические кривые получают для оценки реологических свойств резины в процессе вулканизации и определения оптимальных условий этого процесса – времени и температуры, при которых резина приобретает желаемые механические характеристики. Этот метод основан на использовании реометра – специального прибора, который измеряет изменение крутящего момента или упругости материала во время вулканизации.

На основе анализа реометрической кривой определяются оптимальные условия вулканизации: продолжительность процесса принимается равным времени достижения 90% степени сшивания (t_{90}), а температура соответствует температуре испытания. Для повышения точности исследования можно выполнить серию тестов при разных температурах, чтобы найти наилучший баланс между временем вулканизации и качеством продукта. Данный подход получил широкое распространение в промышленном производстве, в первую очередь при выпуске шинной продукции и иных резинотехнических изделий, где обеспечение строгого контроля технологических параметров является ключевым требованием.

В результате идентификации параметров математической модели (4), получены значения (таблицы 2, 3), которые используются для расчета оптимальных условий технологического процесса. На рисунке 2 представлены графики при априорных и после идентификации значений параметров. Средняя относительная погрешность модели для исследуемых кривых составила:

для 130 °C - 5.34 %;

для 140 °C - 11.15%;

для 150 °C - 7.93%,

что свидетельствует о приемлемой степени точности модели.

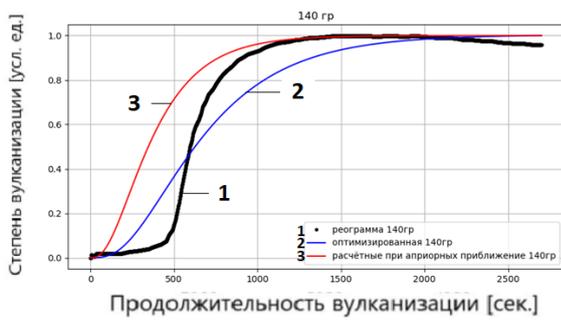


Рисунок 2. Графики реометрических кривых, где 1 – эксперимент, 2 - после оптимизации параметров модели, 3 – от априорных приближений

Figure 2. Graphs of rheometric curves, where 1 is the experiment, 2 - after optimization of the model parameters, 3 - from a priori approximations

Температурное поле сложных многокомпонентных изделий определяется теплофизическими параметрами материалов, его сложной геометрией, а также внутренними источниками тепла, обусловленными тепловыделением при протекании в нем химических реакций и непостоянными по времени температурами на внешней и внутренней поверхностях изделия.

Для определения температурных полей в эквивалентном сечении изделия при нагреве с заданными граничными условиями, использованы данные, представленные в таблице 4. Исследуемый объект представлен многослойным резиновым изделием, где сверху и снизу установлена температура нагревания 443,15 К. Количество слоёв в изделии – тринадцать. На границах сверху и снизу резиновые слои, затем они чередуются с металлическими слоями в направлении к центру изделия.

Используя уравнение теплопроводности в качестве математической модели расчета тепловых полей и используя модели кинетики неизотермической вулканизации [3], получены графики распределения степени завершенности вулканизации по всему объему исследуемого изделия.

Таблица 2. Параметры математической модели кинетики

Table 2. Parameters of the mathematical model of curing kinetics

Параметр / Parameter	Значение / Value
α	1.9492
β	2.0327
γ	2.7629
δ	1.0
ksi	1.6857
tet	1.2212
et	1.4531

На рисунке 3 представлен график поверхности, который показывает, что изделие прогревается неравномерно, т.к. каждый слой характеризуется различными теплофизическими параметрами, которые зависят от состава и температуры. Температура показана по оси Z, также обозначена цветовой шкалой (от фиолетового к красному – от низких к высоким температурам). Из графика видно, что имеется резкий нагрев у поверхности изделия. На начальном этапе (время близко к нулю) температура у поверхности (толщина ближе к нулю) сразу достигает высоких значений (более 430 К). Это отражает то, что тепло сначала поступает извне, и внешние слои нагреваются быстрее. Наблюдается что замедленное прогревание внутренних слоев. Это объясняется тем, что чем дальше внутрь материала (больше толщина), тем дольше нужно времени, чтобы температура достигла равновесия. Внутренние области изделия начинают прогреваться с температуры около 300 К и прогреваются постепенно. При длительном времени (5000–6000 секунд) температура по всей толщине становится почти равномерной – достигается тепловое равновесие. Это указывает на завершение процесса передачи тепла за счет теплопроводности материала. Переход температуры с глубиной и временем происходит гладко, без скачков, что говорит о стабильной теплопередаче, хотя имеются металлические слои в резиновом многослойном изделии.

Таблица 3. Параметры модели кинетики неизотермической вулканизации

Table 3. Parameters of the nonisothermal curing kinetics model

Предэкспоненциальные коэффициенты после идентификации / Pre-exponential coefficients after identification	
k_{01}	17446.498
k_{02}	34819.485
k_{03}	523397.907
k_{04}	34894.064
k_{05}	174470.165
k_{06}	697867.434
k_{07}	24425.002
k_{08}	87124.536
k_{09}	87124.536
Энергии активации после идентификации / Activation energies after identification	
E_1	53010.3505
E_2	55069.6405
E_3	53204.4941
E_4	52996.9493
E_5	52900.3735
E_6	53116.2420
E_7	53017.7857
E_8	55040.5495
E_9	51931.0949

В результате график (рисунке 3) демонстрирует диффузионный характер теплопереноса. Такие данные важны для оценки времени, необходимого для полной вулканизации; определения температурного режима, чтобы все слои изделия достигли нужной температуры, а так же оптимизации процессов нагрева для энергосбережения и повышения качества продукции.

Далее, используя температурные поля и математическую модель кинетики неизотермической вулканизации, рассчитаны массивы степени завершенности вулканизации по всему объему полимерного изделия и представлен 3D-график распределения степени вулканизации (рисунк 5). На этом трёхмерном графике представлена степень вулканизации (ось Z) в зависимости от времени (ось X) и толщины изделия (ось Y). Цветовая шкала показывает уровень завершенности процесса вулканизации от 0 (фиолетовый) до 1 (красный) — то есть от полного отсутствия реакции до полного завершения вулканизации.

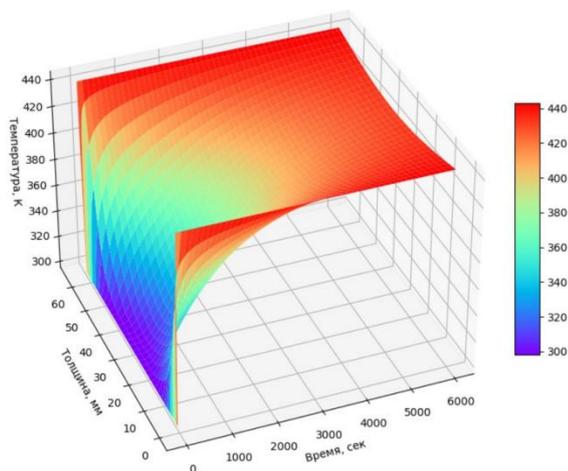


Рисунок 3. Объёмный график температурных полей в многослойном изделии

Figure 3. 3D-graph of temperature fields in a multi-layer product

Видно, что наблюдается почти мгновенная вулканизация у поверхности на ранних стадиях процесса, особенно при малой толщине, после чего степень вулканизации очень быстро достигает значения, близкого к 1 усл. ед. или 100 %. Это объясняется тем, что температура в этих зонах сразу достигает уровня, достаточного для активации вулканизации (рис. 3). Задержка начала и замедление вулканизации вглубь материала наблюдается при увеличении толщины и при малом времени, когда степень вулканизации близка к нулю (фиолетовые и синие зоны). Это связано с тем, что тепло до этих областей доходит позже,

аналогично с графиком изменения температуры. Фронт реакции сдвигается вглубь изделия — с увеличением времени видно, как "волна" вулканизации постепенно продвигается от поверхности к центру, пока вся толщина не достигает 100 % степени вулканизации. Это характерный признак диффузионных процессов, протекающих наряду с химической реакцией, где реакция идёт вслед за тепловым фронтом. После примерно 5000–6000 секунд практически вся толщина изделия имеет степень вулканизации, близкую к 100 %. Это соответствует длительности полного технологического процесса для изделия данной толщины.

Таблица 4. Теплофизические и геометрические параметры изделия

Table 4. Thermophysical and geometric parameters of the product

Параметр / Parameter	Значение / Value
Теплопроводность резиновых слоёв, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	0,2
Теплопроводность металлических слоёв, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	40
Теплоемкость резиновых слоёв, Дж/(м ³ ·К)	3925000
Теплоемкость металлических слоёв, Дж/(м ³ ·К)	1284843,754
Температура на границах изделия, К	443,15
Толщина изделия, м	0,62
Толщина резиновых слоев, м	0,008
Толщина металлических слоёв, м	0,003

Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследования разработан и реализован численный метод расчета оптимального времени вулканизации резиновых изделий, основанный на решении уравнений теплопроводности и кинетики вулканизации. Расчёты проводились с использованием конечно-разностной схемы, метода BDF (формулы обратного дифференцирования, который был предпочтён вместо классического метода Рунге — Кутты для решения изотермической задачи. Полученные температурные поля позволили рассчитать степень структурирования материала по всему объему изделия (рисунок 4).

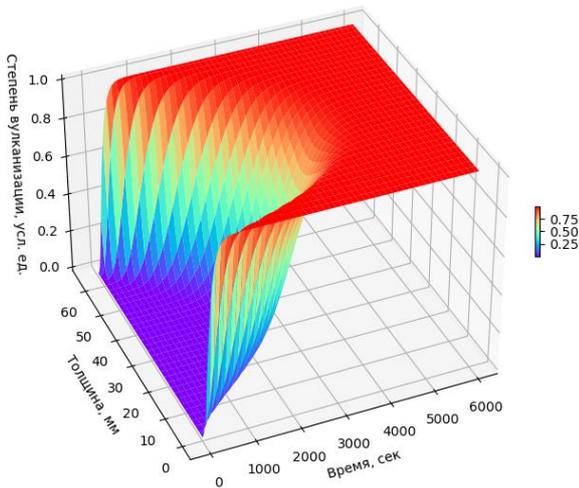


Рисунок 4. График поверхности степени завершенности процесса вулканизации

Figure 4. Graph of the surface of the degree of completion of the vulcanization process

Анализ результатов показал, что при заданных условиях оптимальное время вулканизации составляет 3788 секунд или 63 минуты. За данное время достигается 90-процентная степень вулканизации в срединном сечении многослойного изделия (рисунок 5).

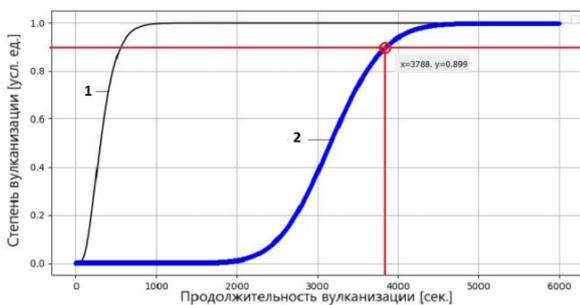


Рисунок 5. График степени завершенности процесса вулканизации, на границах (1) изделия и в центральном сечении (2)

Figure 5. Graph of the degree of completion of the vulcanization process, at the boundaries (1) of the product and in the central section (2)

Предлагаемый метод позволяет оптимизировать температурно-временные параметры вулканизации для широкого спектра резиновых и полимерных композиционных материалов.

Выводы

Определение оптимальных условий процесса вулканизации является важнейшим аспектом технологии переработки резины, влияющим на конечные свойства и эксплуатационные характеристики резиновых изделий. Для этой цели используются различные методы, каждый из которых имеет свой набор принципов, преимуществ и недостатков. Реометрия обеспечивает понимание процесса вулканизации в режиме реального времени путем мониторинга вязкоупругих свойств. ДСК предлагает ценную информацию о реакции вулканизации с учетом термодинамических свойств материала и кинетических характеристик процесса. Испытания механических свойств позволяют непосредственно оценивать эксплуатационные характеристики вулканизированной резины. Испытания на набухание дают представление о плотности сшивания на молекулярном уровне. Спектроскопические методы предлагают подробную информацию об изменениях в химическом строении, происходящих во время вулканизации. Наконец, моделирование позволяет прогнозировать и оптимизировать параметры процесса без проведения обширных экспериментов.

Выбор наиболее подходящего метода или комбинации методов зависит от конкретного применения, желаемого уровня детализации, имеющихся ресурсов и от того, требуется ли мониторинг в режиме реального времени или анализ после вулканизации. Наиболее полное понимание процессов вулканизации достигается при применении комплексного подхода, сочетающего различные исследовательские методики, что обеспечивает эффективную оптимизацию технологического процесса.

Будущие направления исследований в этой области будут сосредоточены на разработке более совершенных методов мониторинга и контроля процесса в режиме реального времени, интеграции искусственного интеллекта и машинного обучения для оптимизации процесса и прогнозирования свойств материала, а также на постоянном акценте по разработке устойчивых и экологически чистых технологий и материалов для вулканизации. Стремление к более эффективным, экономичным и экологически ответственным методам вулканизации резины будут продвигать инновации в этой жизненно важной области материаловедения и инженерии.

Литература

1. Тихомиров С. Г., Пятаков Ю. В., Маслов А. А., Карманова О. В. Determination of thermophysical characteristics of vulcanizable rubber products by the mathematical modeling method // *Journal of Physics: Conference Series*. – Voronezh, 18–20 декабря 2017 года. – Vol. 973. – Voronezh : Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 012048. – DOI 10.1088/1742-6596/973/1/012048.
2. Тихомиров С. Г., Маслов А. А., Линцова Е., Карманова О. В. Software for Researching the Processes of Curing of Polymer Compositions Using Mathematical Modeling // *Communications in Computer and Information Science*. – 2022. – Vol. 1539. – P. 235-253. – DOI 10.1007/978-3-030-95494-9_20.
3. Тихомиров С. Г., Пятаков Ю. В., Карманова О. В. [et al.]. A Technique of Calculating the Kinetics of the Process of Nonisothermal Vulcanization of Large Articles // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2018. – Vol. 53, No. 9-10. – P. 647-652.
4. Тихомиров С. Г., Карманова О. В., Маслов А. А. [и др.]. Моделирование тепловых процессов при вулканизации многослойных резиновых изделий // *Приборы*. – 2023. – № 3(273). – С. 14-19.
5. Маркелов В. Г., Соловьев М. Е. Моделирование процесса вулканизации толстостенных резиновых изделий // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2007. – Т. 50, № 4. – С. 95-98.
6. Дворников Д. Е., Воскресенский А. М., Клочков В. И., Сиротинкин Н. В. Моделирование вулканизации пористых резиновых изделий // *Каучук и резина*. – 2009. – № 4. – С. 35-37.
7. Молчанов В. И., Карманова О. В., Тихомиров С. Г. [и др.]. Моделирование кинетики неизотермической вулканизации массивных резиновых изделий // *Труды БГТУ. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология*. – 2014. – № 4(168). – С. 100-104.
8. Решетников В. Н., Мамросенко К. А. Основы построения тренажерных и обучающих систем сложных технических комплексов // *Программные продукты и системы*. – 2011. – № 3. – С. 86-90.
9. Дьяконов Г. С., Жураковский В. М., Иванов В. Г. [и др.]. Подготовка инженеров в реально-виртуальной среде повышения квалификации : монография. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2009. – 395 с.
10. Fajar Alam Yudha, Bobby Oedy Pramoedyo Soepangkat, Vita Ratnasari, Mokhamad Sufei, Rachmadi Norcahyo. Determination of optimum vulcanization process parameters using Taguchi GRA for reducing quality loss cost // *AIP Conf. Proc.* – 2019. – Vol. 2114. – P. 020014. – DOI 10.1063/1.5112398.
11. Lubura J, Kojić P, Pavličević J, Ikonić B, Balaban D, Bera O. A Novel Approach for Simulation and Optimization of Rubber Vulcanization // *Polymers (Basel)*. – 2023. – Vol. 15, No. 7. – P. 1750. – DOI 10.3390/polym15071750. – PMID: 37050369. – PMCID: PMC10097246.
12. Peter Simon, A. Kučma. DSC Analysis of the Induction Period in the Vulcanisation of Rubber Compounds // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 1999. – Vol. 56, No. 3. – P. 1107-1113. – DOI 10.1023/A:1010148810569.
13. Chu Q, Tian X, Bian H, Wang C. Optimization of Mechanical and Dynamic Properties of Tread Rubber Using Fumed Silica and Hydration Processing // *Polymers (Basel)*. – 2025. – Vol. 17, No. 6. – P. 714. – DOI 10.3390/polym17060714. – PMCID: PMC11945894.
14. Raa Khimi, K. L. Pickering. A New Method to Predict Optimum Cure Time of Rubber Compound Using Dynamic Mechanical Analysis // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2014. – Vol. 131, No. 6. – DOI 10.1002/app.40008.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686769 Российская Федерация. Программный комплекс "Идентификация кинетических параметров математической модели вулканизации полимерных композиций при неизотермических условиях" : № 2024686225 : заявл. 02.11.2024 : опублик. 12.11.2024 / А. А. Маслов, С. Г. Тихомиров, О. В. Карманова, О. А. Другова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий».

References

1. Tikhomirov, S. G., Pyatakov, Yu. V., Maslov, A. A., Karmanova, O. V. (2018). Determination of thermophysical characteristics of vulcanizable rubber products by the mathematical modeling method. *Journal of Physics: Conference Series*, 973, 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/973/1/012048> (Presented at the conference in Voronezh, December 18–20, 2017).
2. Tikhomirov, S. G., Maslov, A. A., Lintsova, E., Karmanova, O. V. (2022). Software for researching the processes of curing of polymer compositions using mathematical modeling. *Communications in Computer and Information Science*, 1539, 235–253. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95494-9_20.
3. Tikhomirov, S. G., Pyatakov, Yu. V., Karmanova, O. V., et al. (2018). A technique of calculating the kinetics of the process of nonisothermal vulcanization of large articles. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(9–10), 647–652.
4. Tikhomirov, S. G., Karmanova, O. V., Maslov, A. A., et al. (2023). Modeling of thermal processes in the vulcanization of multilayer rubber products [Моделирование тепловых процессов при вулканизации многослойных резиновых изделий]. *Pribory (Instruments)*, 3(273), 14–19.
5. Markelov, V. G., & Solovyev, M. E. (2007). Modeling of the vulcanization process of thick-walled rubber products [Моделирование процесса вулканизации толстостенных резиновых изделий]. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology*, 50(4), 95–98.
6. Dvornikov, D. E., Voskresensky, A. M., Klochkov, V. I., & Sirotinkin, N. V. (2009). Modeling of vulcanization of porous rubber products [Моделирование вулканизации пористых резиновых изделий]. *Kauchuk i Rezina (Rubber and Rubber)*, 4, 35–37.
7. Molchanov, V. I., Karmanova, O. V., Tikhomirov, S. G., et al. (2014). Modeling of the kinetics of nonisothermal vulcanization of massive rubber products [Моделирование кинетики неизотермической вулканизации массивных резиновых изделий]. *Proceedings of BSTU. No. 4. Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology*, 4(168), 100–104.
8. Reshetnikov, V. N., & Mamrosenko, K. A. (2011). Fundamentals of building simulator and training systems for complex technical complexes [Основы построения тренажерных и обучающих систем сложных технических комплексов]. *Software Products and Systems*, 3, 86–90.
9. Dyakonov, G. S., Zhurakovsky, V. M., Ivanov, V. G., et al. Training engineers in a real-virtual environment of professional development: Monograph. Kazan National Research Technological University, 2009. — 395.
10. Yudha, F. A., Soepangkat, B. O. P., Ratnasari, V., Suef, M., & Norcahyo, R. (2019). Determination of optimum vulcanization process parameters using Taguchi GRA for reducing quality loss cost. *AIP Conference Proceedings*, 2114, 020014. <https://doi.org/10.1063/1.5112398>.
11. Lubura, J., Kojić, P., Pavličević, J., Ikonić, B., Balaban, D., & Bera, O. (2023). A novel approach for simulation and optimization of rubber vulcanization. *Polymers*, 15(7), 1750. <https://doi.org/10.3390/polym15071750>.
12. Simon, P., Kučma, A. (1999). DSC analysis of the induction period in the vulcanisation of rubber compounds. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 56(3), 1107–1113. <https://doi.org/10.1023/A:1010148810569>.
13. Chu, Q., Tian, X., Bian, H., Wang, C. (2025). Optimization of mechanical and dynamic properties of tread rubber using fumed silica and hydration processing. *Polymers*, 17(6), 714. <https://doi.org/10.3390/polym17060714>.
14. Khimi, R., Pickering, K. L. (2014). A new method to predict optimum cure time of rubber compound using dynamic mechanical analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(6). <https://doi.org/10.1002/app.40008>.
15. Maslov, A. A., Tikhomirov, S. G., Karmanova, O. V., & Drugova, O. A. (2024). Software complex "Identification of kinetic parameters of a mathematical model of vulcanization of polymer compositions under nonisothermal conditions" [Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686769]. Certificate No. 2024686769. Applicant: Voronezh State University of Engineering Technologies.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Тихомиров Сергей Германович	доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры Информационных и управляющих систем, tikhomirov_57@mail.ru SPIN-код: 2010-7100 ORCID: 0000-0002-8192-0049 Researcher ID: D-7046-2014 Scopus Autor ID: 56258071400
Маслов Александр Александрович	кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Информационных и управляющих систем, imasslove@mail.ru SPIN-код: 8088-9985 ORCID: 0000-0001-5964-7894 Researcher ID: T-9259-2017 Scopus Autor ID: 57200393991
Карманова Ольга Викторовна	доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», заведующий кафедрой Технологии органических соединений и переработки полимеров, karolga@mail.ru SPIN-код 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Другова Ольга Алексеевна	студент-бакалавр, студент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», студент кафедры Информационных и управляющих систем, Olia.drugova2016@yandex.ru
Мысливец Максим Николаевич	технический директор ООО "ЭМИРП", m.n.myslivets@gmail.com
Донгаева Мария Вячеславовна	инженер-конструктор ООО "ЭМИРП", marydongalia@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)
Tikhomirov Sergey Germanovich	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of the department of Information and control systems, tikhomirov_57@mail.ru SPIN-code: 2010-7100 ORCID: 0000-0002-8192-0049 Researcher ID: D-7046-2014 Scopus Autor ID: 56258071400
Maslov Alexander Alexandrovich	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Information and control systems, imasslove@mail.ru SPIN-code: 8088-9985 ORCID: 0000-0001-5964-7894 Researcher ID: T-9259-2017 Scopus Autor ID: 57200393991
Karmanova Olga Viktorovna	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, head of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, karolga@mail.ru SPIN-code 6289-1989 ORCID 0000-0003-2226-6582 Researcher ID D-7259-2014 Scopus Autor ID 6506895263
Drugova Olga Alekseevna	student, Voronezh State University of Engineering Technologies, student of the department of Information and control systems, Olia.drugova2016@yandex.ru
Myslivets Maxim Nikolaevich	technical director EMIRP Ltd, m.n.myslivets@gmail.com
Dongaeva Maria Vyacheslavovna	design engineer EMIRP Ltd, marydongalia@gmail.com

статья поступила в редакцию
07.06.2025

одобрена после рецензирования
13.06.2025

принята к публикации
25.06.2025

the article was submitted
07.06.2025

approved after reviewing
13.06.2025

accepted for publication
25.06.2025

ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Елена Владимировна Комарова✉ 1 Kev.vgta@yandex.ru
Владимир Михайлович Болотов 1 za.bolotova@mail.ru
Павел Николаевич Саввин 1 pashkasavvin@yandex.ru

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

Аннотация. Разработан и изучен способ получения новых фармацевтических препаратов с использованием в качестве жировой основы масла ши, обогащенного неомыляемыми веществами, и глицериновых экстрактов природных органических биологически активных соединений, обладающих антиоксидантными, противовоспалительными, антимикробными, антиаллергическими омолаживающими и ранозаживляющими свойствами.

Ключевые слова: биологически активные органические соединения, мази медицинские, масло ши, обогащенное неомыляемыми веществами.

Для цитирования: Комарова Е. В., Болотов В. М., Саввин П. Н. Получение новых фармацевтических препаратов с органическими биологически активными соединениями // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 80-85.

Original article

PRODUCTION OF NEW PHARMACEUTICAL PREPARATIONS WITH ORGANIC BIOLOGICALLY ACTIVE COMPOUNDS

Elena V. Komarova✉ 1 Kev.vgta@yandex.ru
Vladimir M. Bolotov 1 za.bolotova@mail.ru
Pavel N. Savvin 1 pashkasavvin@yandex.ru

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

Abstract. A method for preparing new pharmaceutical preparations using shea butter enriched with non-saponifiable substances and glycerol extracts of natural organic biologically active compounds having antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, antiallergic rejuvenating and wound healing properties has been developed and studied.

Keywords: biologically active organic compounds, medical ointments, shea butter enriched with non-saponifiable substances.

For citation: Komarova E. V., Bolotov V. M., Savvin P. N. Production of new pharmaceutical preparations with organic biologically active compounds. *Ingenernye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 80-85.

Введение

Сегодняшняя косметическая и фармацевтическая промышленность предлагает покупателям разнообразный ассортимент продукции для ухода за кожей, насыщенной множеством биоактивных компонентов.

Современные компоненты косметики, используемые для производства мазей, кремов и гелей, позволяют разработчикам формул создавать различные сенсорные эффекты, усиливать проникновение полезных веществ в кожные покровы, обеспечивать стабильность косметических изделий и сохранность всех действующих ингредиентов.

Средства косметического и фармакологического назначения, включающие растительные экстракты естественного происхожде-

ния, отличаются высоким уровнем спроса и конкурентоспособности на рынке.

Сейчас активно проводятся исследования и внедряются препараты, изготовленные на основе лекарственных растений российского происхождения.

Особое внимание уделяется использованию мази как эффективной лекарственной формы, сочетающей основы различного типа с природными органическими веществами отечественных трав и растений.

Материал и методы исследования

Для получения новых образцов фармацевтической продукции, в качестве которых были выбраны медицинские мази, получали экстракты биологически активных соединений из термообработанного растительного сырья (травы череды трехраздельной (*Bidens tripartita*

L.), крапивы двудомной (*Urtica dióica*), валерианы лекарственной (*Valeriana officinális*) в различных соотношениях глицерином, нагретым до 60°C.

Комплексные экстракты натуральных биологически активных соединений, обладающих антиоксидантными, противовоспалительными, антимикробными, антиаллергическими омолаживающими и ранозаживляющими свойствами, исследовались спектрофотометрическим и цветометрическим методами [4, 5, 6, 7, 8].

При проведении исследований образцы хранились в темном месте при комнатной температуре в течение 180 суток.

Экстракты имеют прозрачную структуру и яркие оттенки – от светлого желтого до насыщенного зеленого цвета, зависящие от состава используемых растительных компонентов.

Эти образцы богаты биологически активными соединениями: каротиноидами (включая ксантофиллы), антоцианами, флавоноидами, танинами, витаминами группы А, С, Е и органическими кислотами.

Сырье трав череды, крапивы двудомной и валерианы лекарственной представлено в виде высушенных измельченных частей растения либо фильтр-пакетиков с порошком, предназначенных для заваривания настоев.

Таким образом, спектр готовых лекарственных форм, содержащих фитосоставляющие из указанного растительного материала, достаточно узкий, что создает необходимость разработки новых препаратов на основе данной флоры. Извлечения из растений обладают выраженным терапевтическим действием, не провоцируя серьезных нежелательных реакций, в отличие от искусственных аналогов.

Учитывая фармакопейный статус сырья и увеличившуюся потребность в наружных средствах, мы провели экспериментальное исследование различных мазевых составов, используя глицериновую основу для создания мазей на основе биологически активных соединений травы череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.), крапивы двудомной (*Urtica dióica*) и валерианы лекарственной (*Valeriana officinális*). Для изготовления мази была выбрана комбинированная мазевая основа: гидрофобные: масло ши и глицерин.

Биологически активные соединения вносили в процентном соотношении от общей массы смеси 1:100.

Для гомогенизации мази добавляли эмульгатор соевый лецитин в соотношении с жировой основой 1:4.

Результаты исследования и их обсуждение

Биологически активные соединения, извлеченные из растительного сырья, подвергались спектрофотометрическому исследованию на аппаратуре марки СФ–56 в течение периода длительностью 180 суток.

Результаты показали наличие важных биологически активных пигментов: ксантофиллов (максимальные значения наблюдались при длине волны 428, 450 и 476 нм), антоцианов и флавоноидов, что подтвердилось наличием пиков в области 490–550 нм и 665 нм. Анализ спектральных характеристик продемонстрировал, что химический состав компонентов сохраняется неизменным в течение всего срока хранения.

Цветность исследуемых экстрактов была оценена методом анализа в цветовой модели RGB, подтвердив устойчивость сохранности биологической активности компонентов на весь период испытаний.

Широкий спектр воздействия изученных экстрактов объясняется содержанием значительного числа биологически активных соединений, преимущественно представленных флавоноидами, каротиноидами и полисахаридами, при этом важную роль играют и другие вспомогательные элементы, включая дубильные вещества.

Проведён детальный анализ основных физико-химических показателей приготовленных мазей. Мазевые композиции с биологически активными компонентами характеризуются гладкой, плотностью консистенции, удобством нанесения на поверхность кожи, отсутствием образования плёнок и комков. Присутствие глицерина обеспечивает длительное сохранение эффективности препарата, позволяя экономить продукт при использовании (таблица 1).

Образцы мазей, приготовленных с добавлением экстрактов биологически активных соединений? полученных из травы череды трехраздельной (*Bidens tripartita* L.), крапивы двудомной (*Urtica dióica*), и валерианы лекарственной (*Valeriana officinális*) анализированные с помощью метода компьютерной цветометрии на протяжении 6 месяцев (рисунки 1-3).

Таблица 1. Характеристики лечебных мазей на основе обогащенными неомыляемыми веществами масла ши с использованием природных органических биологически активных соединений

Table 1. Characteristics of medicinal ointments based on shea butter enriched with unsaponifiable substances using natural organic biologically active compounds

Название мази Ointment name	Компоненты / Components	Значение pH / pH value	Органолептические характеристики / Organoleptic characteristics
Мазь №1 с БАС травы череды	Глицериновый экстракт БАС травы череды, соевый лецитин, масло ши, обогащенное неомы- ляемыми веществами	6	Мазь однородной, плотной конси- стенцией с равномерно распределен- ными в ней компонентами темно- оранжевого цвета
Мазь №2 с БАС крапивы двудомной	Глицериновый экстракт БАС крапивы двудомной, соевый лецитин, масло ши, обо- гащенное неомыляемыми веществами	6	Мазь однородной, плотной конси- стенцией с равномерно распределенными в ней компонентами насыщенно зеленого цвета
Мазь №3 с БАС валери- аны лекарствен- ной	Глицериновый экстракт БАС валерианы лекарственной, соевый лецитин, масло ши, обо- гащенное неомыляемыми веществами	6	Мазь однородной, плотной конси- стенцией с равномерно распределенными в ней компонентами светло-желтого цвета

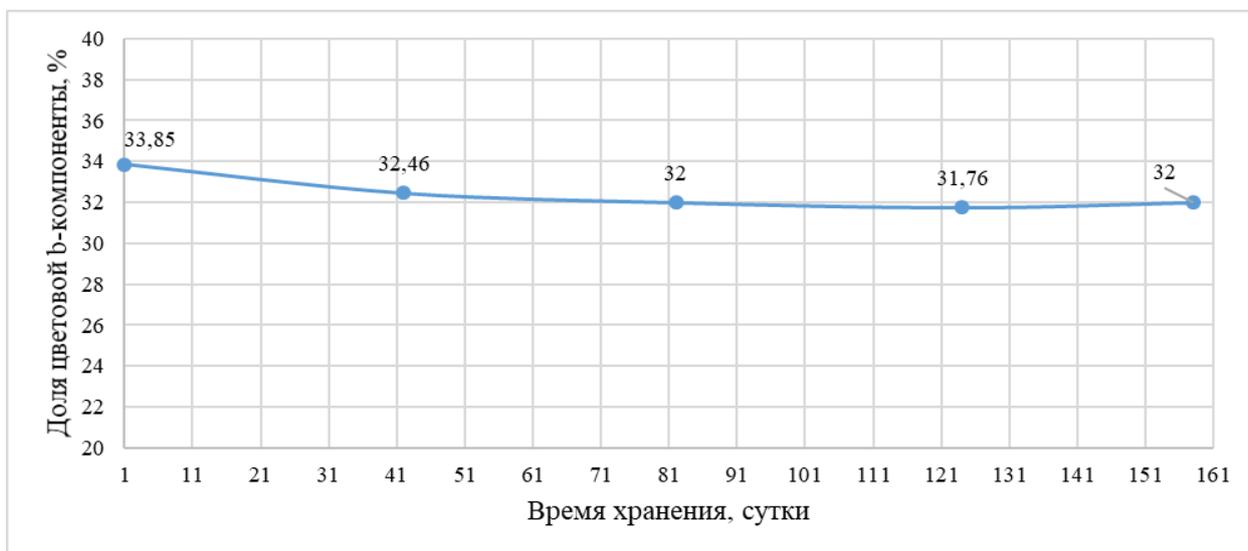


Рисунок 1. Доля цветовой b-компоненты мази №1

Figure 1. Proportion of the color b component of ointment No. 1

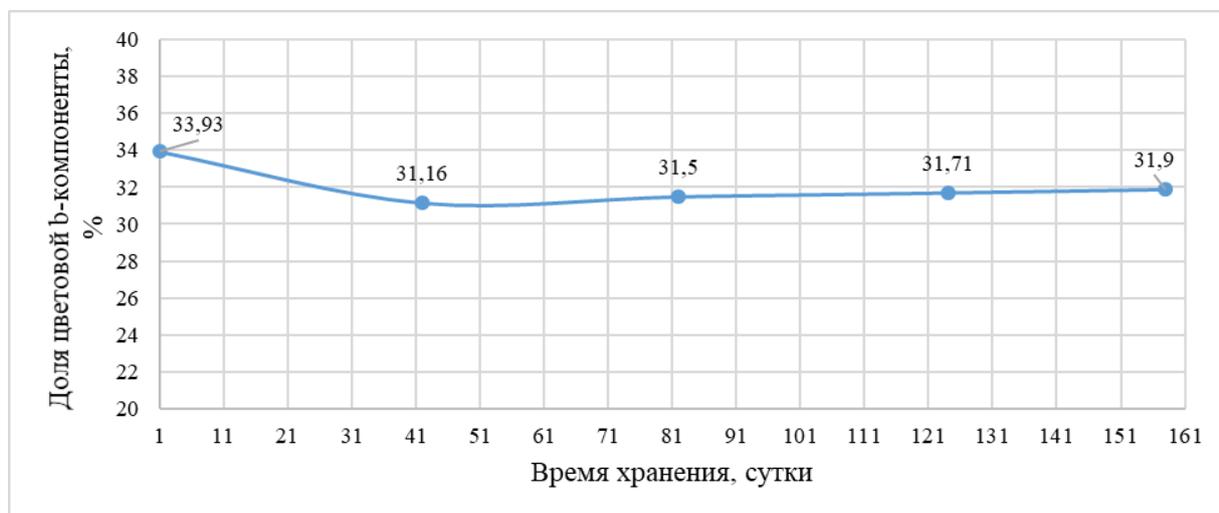


Рисунок 2. Доля цветовой b-компоненты мази № 2

Figure 2. Proportion of the color b component of ointment No. 2

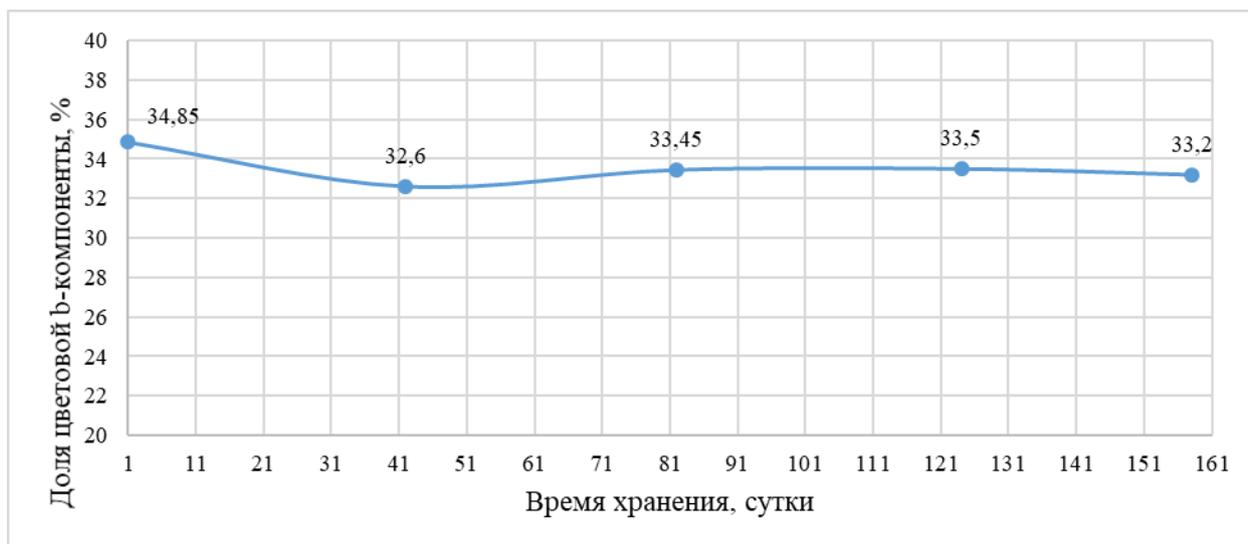


Рисунок 3. Доля цветовой b-компоненты мази №3

Figure 3. Proportion of the color b component of ointment No. 3

Установлено, что изменения цветовой компонент при хранении образцов мазей происходят незначительно.

Выводы

Исследования полученных мазей показали стабильность сохранности биологически активных органических соединений на протяжении всего срока хранения образцов.

Подтверждено, что все созданные лекарственные препараты, содержащие изучаемые биологически активные соединения растительного происхождения, полностью удовлетворяют установленным нормативам качества ГОСТ 29188.0-91 (определение внешнего вида, цвета и однородности) и ГОСТ 29188.2-91 (определения водородного показателя pH).

Литература

1. Краснюк, И. И. Фармацевтическая технология. Технология лекарственных форм : учебник для вузов / И. И. Краснюк, С. А. Валиев, Г. В. Михайлова. – Москва: Академия, 2006. – 592 с.
2. Бойченко, Н.Б. Мягкие лекарственные формы. Технология приготовления и особенности прописи рецептов: метод. указания [Электронный ресурс] / Н.Б. Бойченко, В.А. Колесников; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 324 с.
3. Кондратьева Т.С. Технология лекарственных форм в 2-х т. / Т.С. Кондратьева. - М.: Медицина, 2014. - Т.1. - 496с.
4. Болотов, В.М. Способ получения гидрофобных флавоноловых и антоциановых соединений из флавоноидсодержащего растительного сырья : Патент РФ на изобретение № 2733411 С1, 01.10.2020. Болотов В.М., Комарова Е.В., Саввин П.Н.
5. Пат. 2139306 РФ. С 09 В 61/00. Способ получения модифицированного каротиноидного красителя из растительного сырья / В.М.Болотов, Г.О.Магомедов, О.Б.Рудаков, Е.В.Комарова (Россия). - № 98114475/13; Заявлено 20.07.98.; Опубл. 10.10.99., Бюл. № 28 // Изобретения. 1999. № 28.
6. Комарова Е.В., Болотов В.М., Саввин П.Н. Применение смесевых БАС для расширения ассортимента фармпрепаратов. Технология органических веществ: материалы 88-ой науч.-технич. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января - 16 февраля 2024 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов.–Минск: БГТУ, 2024. – 442 с, с.333-334.
7. Комарова Е.В., Болотов В.М. Применение гидрофилизированных каротиноидных БАС для получения новых фармпрепаратов. Материалы LXII отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2023 год : В 3 ч. Ч. 1. / под ред. О.С. Корнеевой; Воронеж. гос. ун-т инж.технол. – Воронеж: ВГУИТ, 2024. 148с. С. 122.
8. Комарова Е.В., Болотов В.М. Исследование свойств модифицированных БАС сельскохозяйственного растительного сырья. Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение. Сборник научных статей и докладов XI Международной научно-практической конференции ВГУИТ. – Воронеж: ВГУИТ, 2024. - С. 170-175.

References

1. Krasnyuk, I. I. Pharmaceutical technology. Technology of dosage forms : textbook for universities/I. I. Krasnyuk, S. A. Valevko, G. V. Mikhailova. - Moscow: Academy, 2006. - 592 s.
2. Bolotov, V.M. Method for preparing hydrophobic flavonol and anthocyanin compounds from flavonoid-containing plant raw materials : Russian patent for invention No. 2733411 S1, 01.10.2020. V.M. Bolotov, E.V. Komarova, P.N. Savvin
3. Perikova, L.I. Method for producing an alcohol-water-soluble carotenoid dye from plant material: Russian patent for invention No. 2221829 22.07.2002. L.I. Perikova, V.M. Bolotov, O.B. Rudakov.
4. Bolotov, V.M. Method of obtaining hydrophobic flavonol and anthocyanin compounds from flavonoid-containing plant raw materials : RF Patent for invention No. 2733411 C1, 01.10.2020. Bolotov V.M., Komarova E.V., Savvin P.N.
5. Patent 2139306 of the Russian Federation. From 09 To 61/00. A method for obtaining a modified carotenoid dye from vegetable raw materials / V.M.Bolotov, G.O.Magomedov, O.B.Rudakov, E.V.Komarova (Russia). - No. 98114475/13; Announced 07/20/98.; Publ. 10.10.99., Bul. No. 28 // Inventions. 1999. № 28.
6. Komarova E.V., Bolotov V.M., Savvin P.N. The use of blended BASS to expand the range of pharmaceutical products. Technology of organic substances: materials of the 88th Scientific and Technical Conference of faculty, researchers and postgraduates (with international participation), Minsk, January 29 - February 16, 2024 [Electronic resource] / ed. by I. V. Voitov.–Minsk: BSTU, 2024. - 442 p., pp.333-334.
7. Komarova E.V., Bolotov V.M. The use of hydrophilized carotenoid BAS for the production of new pharmaceutical preparations. Materials of the LXII reporting Scientific Conference of VGUIT teachers and researchers for 2023 : At 3 p.m. 1. / edited by O.S. Korneeva; Voronezh State University of Engineering Technology. Voronezh: VGUIT, 2024. 148с. p. 122.
8. Komarova E.V., Bolotov V.M. Investigation of the properties of modified UAS of agricultural plant raw materials. Food security: scientific, personnel and information support. Collection of scientific articles and reports of the XI VGUIT International Scientific and Practical Conference. Voronezh: VGUIT, 2024, pp. 170-175.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Комарова Елена Владимировна	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, Kev.vgta@yandex.ru SPIN-код 2502-0325
Болотов Владимир Михайлович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, za.bolotova@mail.ru SPIN-код 9943-8965
Саввин Павел Николаевич	кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, pashkasavvin@yandex.ru SPIN-код 6003-1023

Authors information

<i>Last name, first name, patronymic</i>	<i>Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)</i>
Komarova Elena Vladimirovna	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, Kev.vgta@yandex.ru SPIN-code 2502-0325
Bolotov Vladimir Mikhailovich	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, za.bolotova@mail.ru SPIN-code 9943-8965
Savvin Pavel Nikolaevich	PhD, associate professor, Voronezh state university of engineering technologies, associate professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, pashkasavvin@yandex.ru SPIN-code 6003-1023

статья поступила в редакцию 02.06.2025	одобрена после рецензирования 13.06.2025	принята к публикации 24.06.2025
the article was submitted 02.06.2025	approved after reviewing 13.06.2025	accepted for publication 24.06.2025

ПРОВЕДЕНИЕ КОАГУЛЯЦИИ ЛАТЕКСА БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНОГО КАУЧУКА СОЛЬЮ МЕЛАМИНА БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Анна Витальевна Мякишева✉	1	annamakiseva01@gmail.com
Елена Андреевна Моргачева	1	lena_morgacheva@mail.ru
Наталья Юрьевна Санникова	1	cnu@inbox.ru
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 предложена возможность проведения процесса коагуляции эмульсионного бутадиен-стирольного каучука коагулянтном на основе меламина соли без введения в систему водного раствора серной кислоты. Установлено, что применение меламина соли позволяет полностью и частично исключить использование водного раствора серной кислоты, что связано с предварительным подкислением меламина соляной кислотой. Отмечено, что со снижением расхода подкисляющего агента возрастает расход соли меламина. Физико-механические свойства вулканизатов, полученных на основе выделенного каучука, соответствуют предъявляемым требованиям.

Ключевые слова: латекс, коагулянт, меламин, выделение, каучук.

Для цитирования: Мякишева А. В., Моргачева Е. А., Санникова Н. Ю., Пугачева И. Н., Никулин С. С. Проведение коагуляции латекса бутадиен-стирольного каучука солью меламина без применения серной кислоты // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 86-92.

Original article

COAGULATION OF STYRENE BUTADIENE RUBBER LATEX WITH MELAMINE SALT WITHOUT THE USE OF SULFURIC ACID

Anna V. Myakisheva ✉	1	annamakiseva01@gmail.com
Elena A. Morgacheva	1	lena_morgacheva@mail.ru
Natalya Yr. Sannikova	1	cnu@inbox.ru
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 suggests the possibility of coagulating emulsified styrene butadiene rubber with a coagulant based on melamine salt without introducing an aqueous solution of sulfuric acid into the system. It has been established that the use of melamine salt makes it possible to completely and partially eliminate the use of an aqueous solution of sulfuric acid, which is associated with the preliminary acidification of melamine with hydrochloric acid. It is noted that with a decrease in the consumption of acidifying agent, the consumption of melamine salt increases. The physico-mechanical properties of vulcanizates obtained on the basis of isolated rubber meet the requirements.

Keywords: latex, coagulant, melamine, isolation, rubber.

For citation: Myakisheva A. V., Morgacheva E. A., Sannikova N. Yr., Pugacheva I. N., Nikulin S. S. Coagulation of styrene butadiene rubber latex with melamine salt without the use of sulfuric acid. *Ingenerynye tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 86-92.

Введение

В эпоху технологического прогресса и инновационных материалов ключевую роль в индустрии развития играет создание полимерных материалов. Синтезированные полимеры, к которым относится бутадиен-стирольного каучука (БСК), широко востребованы в различных отраслях промышленности. Автомобильная и резинотехническая промышленности не могут обойтись без БСК, так как он обеспечивает высокие показатели прочности и

надежности изделий на его основе, в частности шин, обуви и потребительских товаров [1-3].

Несмотря на технологические достижения в области производства БСК, индустрия сталкивается с проблемами, требующими неотложного решения. Одним из проблемных этапов производства каучука БСК является процесс извлечения каучука, связанный с материалоёмкостью сырья, технической сложностью и негативным влиянием на состояние окружающей среды [1]. Это обусловлено

использованием хлорида натрия в качестве коагулянта. Его расход может достигать значительных количеств (до 250 кг/т каучука), что сказывается на составе сточные воды после извлечения полимера [5]. В состав стоков входят опасные вещества, связывание которые в ионно-солевой комплекс, входящий в крошку каучука, не обеспечивается данным коагулянтом [4].

Одним из перспективных направлений решения указанных проблем является разработка и внедрение более эффективных коагулянтов. Исследования [13-17] показывают, что использование альтернативных коагулирующих веществ, таких как азотосодержащие соединения и полиэлектролиты на их основе, может снизить расход коагулянтов и негативное воздействие на окружающую среду. Высокий акцент на исследованиях азотосодержащих коагулянтов связан с возможностью аммонийных соединений нарушать стабильность мыл карбоновых и алкилсульфоновых кислот, которые поддерживают стабильность латексных частиц [6]. Более того, аммонийные соединения, особенно четвертичные соли аммония, способны, вступая в реакцию с эмульсионной системой, образовывать ионно-солевой комплекс, захватываемый образующейся крошкой каучука. Процесс требует небольшого расхода коагулянта (не более 5 кг/т каучука) и характеризуется малым колебанием уровня pH.

Если посмотреть с другой точки зрения, то промышленное использование аммонийных соединений сопряжено с определёнными проблемами: ограниченная доступность, высокая цена, невозможность использования в некоторых действующих технологических процессах производства эмульсионных каучуков [7-8]. Несмотря на указанные недостатки, их преимущество делают их перспективными

коагулянтами и являются стимулом для проведения исследований в данном направлении.

В качестве одной из альтернатив можно рассмотреть меламин, коагулирующие действия которого подтверждены исследованиями [10]. Меламин или циануротриамид относится к азотосодержащим органическим веществам и в отличие от многих четвертичных солей аммония, он доступен на рынке и не отличается высокой стоимостью, активно используется в изготовлении клеев, посуды, смол, лакокрасочных и других материалов, обладающих благодаря ему повышенной устойчивостью к воздействию огня и влаги [9].

Меламин представляет собой кристаллическое вещество белого цвета, характеризующееся низкой растворимостью в воде [11]. В виду этого в экспериментах применялась меламиновая соль ($C_3H_6N_6 \cdot HCl$), которая была получена путем растворения при 80°C кристаллов меламин в воде в кислой среде (pH ~ 1), созданной соляной кислотой. Учитывая кислую природу коагулянта, представляется рациональным изучение возможности частичного и полного отказа от серной кислоты в техпроцессе выделения, традиционно используемой в качестве подкисляющего агента.

Целью исследования – потенциальная возможность использования соли меламин с вариантами частичного и полного исключения серной кислоты из процесса извлечения бутадиен-стирольного каучука из латекса.

Материал и методы исследования

Объектом исследования служил латекс бутадиен-стирольного каучука марки СКС-30АРК, имеющий характеристики, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики латекса бутадиен-стирольного каучука марки СКС-30АРК

Table 1. Characteristics of latex styrene-butadiene rubber brand SKS-30ARK

Показатель / Indicator	Значение / Value
Сухой остаток, % / Dry residue, %	20,0-22,0
Поверхностное натяжение σ , мН/м / Surface tension σ , mN/m	54,0-57,0
pH латекса / pH of latex	10
Размер латексных частиц r, нм / Latex particle size r, nm	40-65
Содержание связанного стирола, % / Content of bound styrene, %	22,0-23,5

В качестве коагулянта латекса в исследовании применялась меламиновая соль $C_3H_6N_6 \cdot HCl$ с концентрацией водного раствора 2,0 % мас., в качестве подкисляющего агента - водный раствор H_2SO_4 с концентрацией 2,0 % мас.

Выделение каучука из латекса осуществляли согласно методике, описанной в ра-

боте [12] на установке, представляющей собой емкость с перемешивающим устройством. В емкость для коагуляции помещали латекс бутадиен-стирольного каучука марки СКС-30АРК (сухой остаток 21,2 % мас.) и устанавливали в термостат для поддержания температуры 20 °С. После выхода на температурный

режим в латекс вводили расчётное количество $C_3H_6N_6 \cdot HCl$ и гомогенизировали 10-15 секунд. В полученную смесь приливали водный раствор подкисляющего агента - H_2SO_4 , с изменением его расхода от 0 до 15 кг/т каучука.

Образующуюся крошку каучука отделяли от водной фазы (серума), промывали водой и обезвоживали в сушильном агрегате при температуре 80 – 85 °С. Высушенную крошку каучука извлекали из сушильного агрегата, охлаждали, взвешивали на аналитических весах и проводили расчет выхода крошки каучука в зависимости от условий коагуляции.

Оценку протекающего процесса контролировали, основываясь на прозрачности серума и массе образовавшейся крошки каучука.

Результаты исследования и их обсуждение

Процесс выделения каучука из латекса меламиновой солью протекает по нейтрализационному механизму.

При взаимодействии коагулянта с компонентами эмульсионной системы латекса образуются ионно-солевые комплексы, которые в присутствии серной кислоты, как подкисляющего агента, сопровождается выделе-

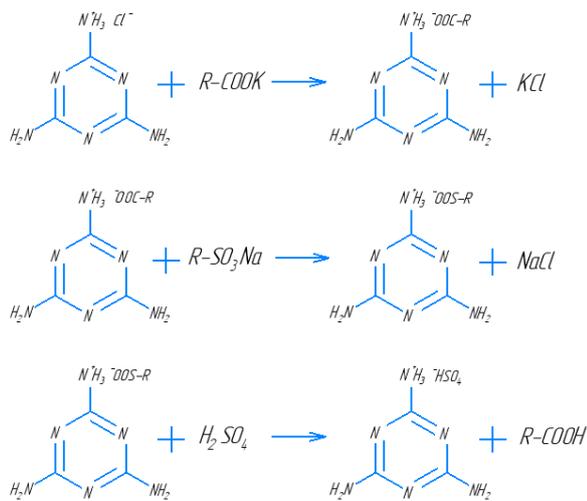


Рисунок 1. Процессы, протекающие при выделении каучука из латекса меламиновой солью в присутствии серной кислоты

Figure 1. Processes occurring during the separation of rubber from latex by melamine salt in the presence of sulfuric acid

Учитывая тот факт, что для получения соли на основе меламина используется сильная соляная кислота, то её добавка в меламина придает получаемой соли кислую среду ($pH \sim 1$). Базируясь на этом, можно предположить, что процесс выделения каучука из латекса в сильнокислой среде коагулирующего агента будет

протекать без дополнительного подкисления системы серной кислотой или с меньшим её расходом.

Это в какой-то мере подтверждается результатами исследований, представленными в таблице 2.

Протекать без дополнительного подкисления системы серной кислотой или с меньшим её расходом.

Постепенное уменьшение расхода серной кислоты с 15 до 5 кг/т каучука приводит к снижению кислотности коагулируемой системы. Можно предвидеть, что образовавшиеся ионно-солевые комплексы между анионными ПАВ и меламиновой солью, при снижении кислотности коагулируемой системы, будут не полностью распадаться с выделением высшей карбоновой кислоты и образованием меламиновой соли. Это будет приводить к захвату данных продуктов образующейся крошкой каучука. Кроме того, при снижении кислотности коагулируемой системы будет уменьшаться вероятность перевода мыл карбоновых кислот в карбоновые кислоты.

Химические процессы, протекающие при выделении каучука из латекса в присутствии меламиновой соли, можно представить рисунками 1, 2.

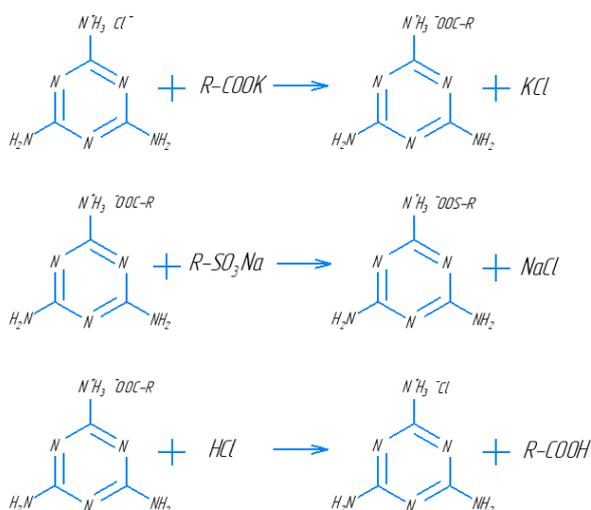


Рисунок 2. Процессы, протекающие при выделении каучука из латекса меламиновой солью при отсутствии серной кислоты

Figure 2. Processes occurring during the separation of rubber from latex by melamine salt in the absence of sulfuric acid

протекать без дополнительного подкисления системы серной кислотой или с меньшим её расходом.

Это в какой-то мере подтверждается результатами исследований, представленными в таблице 2.

Таблица 2. Экспериментальные данные по выделению каучука из латекса солью меламина с изменением расхода H_2SO_4

Table 2. Experimental data on the separation of rubber from latex by melamine salt with a change in flow rate H_2SO_4

Вид коагулянта / Type of coagulant	меламиновая соль / melamine salt ($C_3H_6N_6 \cdot HCl$)									
Расход коагулянта, кг/т каучука / Coagulant consumption, kg/t of rubber	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	
Расход H_2SO_4 , кг/т каучука / Consumption of H_2SO_4 , kg/t of rubber	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Выход крошки каучука, % / Rubber crumb output, %	19,1	31,9	46,2	57,1	88,1	91,4	93,0	93,1	93,2	
Оценка полноты коагуляции / Assessment of the completeness of coagulation	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп	кп	кп	кп	кп
рН	~1,5									
Вид коагулянта	меламиновая соль ($C_3H_6N_6 \cdot HCl$)									
Расход коагулянта, кг/т каучука	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	
Расход H_2SO_4 , кг/т каучука	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Выход крошки каучука, %	17,7	26,6	35,2	49,5	61,4	85,4	92,1	92,6	92,7	
Оценка полноты коагуляции	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп	кп	кп	кп
рН	~3,0									
Вид коагулянта	меламиновая соль ($C_3H_6N_6 \cdot HCl$)									
Расход коагулянта, кг/т каучука	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	
Расход H_2SO_4 , кг/т каучука	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Выход крошки каучука, %	8,6	12,8	20,4	40,1	56,2	81,4	87,6	91,4	92,1	
Оценка полноты коагуляции	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп	кп	кп
рН	~3,7									
Вид коагулянта	меламиновая соль ($C_3H_6N_6 \cdot HCl$)									
Расход коагулянта, кг/т каучука	1,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	
Расход H_2SO_4 , кг/т каучука	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Выход крошки каучука, %	-	6,2	17,6	53,8	59,5	67,1	89,1	90,0	92,4	
Оценка полноты коагуляции	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кнп	кп
рН	~5,0									

Примечание: кп – коагуляция полная; кнп – коагуляция неполная; температура 20 °С

Отмечается интересная особенность при выделении каучука СКС-30 АРК из латекса с изменяющимся расходом серной кислоты.

В случае выделения каучука СКС-30АРК из латекса с использованием серной кислоты с расходом 15 кг/т каучука полнота коагуляции латекса достигалась при расходе меламиновой соли 25 кг/т каучука. Уменьшение расхода серной кислоты до 10 и, в дальнейшем, до 5 кг/т каучука приводит к увеличению расхода коагулянта с 30 до 35 кг/т каучука соответственно.

Полное исключение H_2SO_4 из процесса повышает расход $C_3H_6N_6 \cdot HCl$ до 40 кг/т каучука. Необходимо отметить, что уменьшение расхода серной кислоты на выделение каучука приводит к снижению кислотности системы и повышению рН водной фазы (серума) до ~5,0. Это связано с тем, что дозировка соляной кислоты в меламине для получения соли небольшая и не превышает 1 кг/т каучука. Невысокий расход соляной кислоты не может покрыть

требуемый расход подкисляющего агента, необходимого для перевода мыл карбоновых кислот в карбоновые кислоты.

Снижение кислотности коагулируемой системы будет приводить к неполному переводу мыл карбоновых кислот в карбоновые кислоты. Согласно требованиям ГОСТ 15627-2019 доля органических кислот должна составлять 5,0-7,0 %, а массовая доля мыл органических кислот не должна превышать 0,3 %. Неполное превращение мыл в свободные карбоновые кислоты недопустимо из-за негативного влияния их на вулканизационные процессы (ускорение их); снижению устойчивости к старению, возникновению проблем в их переработке и др.

Таким образом, расход подкисляющего агента нельзя снижать менее 10 кг/т каучука.

Водную фазу после отделения крошки каучука можно вернуть обратно в технологию для приготовления растворов коагулирующего и подкисляющего агентов. Замкнутая система

водопотребления позволит снизить расход воды, потребляемой цехами производства эмульсионных каучуков и снизить загрязнение окружающей среды.

На основе выделенных каучуков были созданы резиновые композиции и вулканизированные материалы по общепринятой технологии с использованием стандартных компонентов, согласно [13]. Исследование физико-механических параметров вулканизатов показало на их соответствие ГОСТ 15627-2019.

Выводы

Эффективность извлечения каучука СКС-30АРК из латекса напрямую зависит от количества использованного катионного электролита и подкислителя. Полное извлечение достигается при расходе меламиновой соли в

25 кг на тонну каучука в сочетании с расходом серной кислоты – 15 кг/т каучука.

Полное удаление серной кислоты из процесса выделения каучука приводит к увеличению расхода меламиновой соли до 40 кг на тонну каучука. Кроме того, pH системы повысится до ~5, что не обеспечивает перевод мыл карбоновых кислот в карбоновые кислоты. Поэтому полное исключение серной кислоты из технологического процесса недопустимо. Возможно частичное исключение серной кислоты до расхода в 10 кг на тонну.

Физико-механические свойства вулканизированных материалов на основе каучука, полученного извлечения меламиновой солью, соответствует требованиям ГОСТ 15627-2019.

Литература

1. Никулин С.С. и др. Обеспечение техносферной безопасности при производстве эмульсионных каучуков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2022. № 8. С. 85-91.
2. Аксёнов В.И., Насыров И.Ш. Производство синтетического каучука в России: анализ итогов за 2022 г. перспективы развития // Промышленное производство и использование эластомеров. 2023. № 1. С. 3-14.
3. Шашок Ж.С., Усс Е.П. Технология эластомерных материалов. Ингредиенты резиновых смесей. 2019.
4. Химия и технология синтетического каучука / Л.А. Аверко-Антонович [и др.] – М.: Химия, КолосС, 2008. – 357 с.
5. Н. М. Ровкина. Химия и технология полимеров. Получение полимеров методами поликонденсации и полимераналогичных превращений / Ровкина, Н. М. // Лабораторный практикум / Н. М. Ровкина, А. А. Ляпков. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 241 с.
6. А. Е. Корнев. Технология эластомерных материалов / Корнев А.Е. и др. // М.: НППА «Истек». – 2009. – 504 с.
7. Кузнецов В.А. Практикум по высокомолекулярным соединениям: учебное пособие. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2014. 166 с.
8. Фам К.Д. и др. Коагуляция латекса натурального каучука поли-N,N'-диаллил-N,N'-диметиламмоний хлоридом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 70-74.
9. Журавлева Л.Н. Технология клееных материалов и древесных плит. Раздел «Синтетические клеи». Красноярск: СибГТУ, 2013. 68 с.
10. Мякишева А. В. Перспективность применения при выделении бутадиен-стирольного каучука из латекса меламина / А. В. Мякишева // 75-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов : тезисы докладов, 22-27 апреля 2024 г., Минск : в 4 ч. Ч. 2. - Минск : БГТУ, 2024. – С. 68-69.
11. Золотов, Ю. А. Введение в аналитическую химию : учебное пособие / Ю. А. Золотов. – 3-е изд. (эл.). – Москва : Лаборатория знаний, 2024. – 266 с.
12. Пояркова Т.Н. Практикум по коллоидной химии латексов / Пояркова Т.Н., Никулин С.С., Пугачева И.Н., Кудрина. Г.В., Филимонова О.Н. // [Текст]: учеб. пособие – М.: Издательский дом «Академии Естествознания». – 2011. – с. 124.
13. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение. СПб.: Профессия. – 2004. – с. 240.
14. Никулина Н.С. Выделение бутадиен-стирольного каучука из латекса гибридным коагулянтном на основе полидиметилдиаллил-аммоний хлорида и вязкого волокна / Никулина Н.С., Пугачева И.Н., Мисин В.М., Санникова Н.Ю., Вережников В.Н., Никулин С.С. – Текст: непосредственный // Изв. вузов. Химия и хим. технология. - 2021. - Т. 64. Вып. 6 – с. 62 -68.

15. Чурилина Е. В. Новые полимерные системы на основе N,N-диметил-N,N-диаллил-аммонийхлорида для повышения экологичности технологии получения эмульсионных каучуков / Чурилина Е. Л., Никулин С. С., Никитин К. К., Сергеев М. В. - Текст: непосредственный // V Всероссийская конференция «химия и химическая технология: достижения и перспективы». – 2020. – с. 99.1-99.3.

16. Никулина Н.С. Солянокислый феназин в технологии производства эмульсионных каучуков. / Никулина Н.С., Вережников В.Н., Власова Л.А., Никулин С.С. - Текст: непосредственный // Изв. вузов. Химия и хим. технология. - 2024. - Т. 67. Вып. 1. - С. 83-88.

17. Провоторова М.А. Перспектива применения отхода свеклосахарного производства в технологии получения маслосодержащих каучуков / Провоторова М.А., Никулина Н.С., Вережников В.Н., Никулин С.С. – Текст: непосредственный // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2015. - №4 – с. 46-61.

References

1. Nikulin S.S. and others. Ensuring technospheric safety in the production of emulsion rubbers // Bulletin of the Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov. 2022. No. 8. pp. 85-91.

2. Aksenov V.I., Nasyrov I.Sh. Synthetic rubber production in Russia: analysis of the results for 2022. development prospects // Industrial production and use of elastomers. 2023. No. 1. pp. 3-14.

3. Shashok J.S., Uss E.P. Technology of elastomeric materials. Ingredients of rubber compounds. 2019.

4. Chemistry and technology of synthetic rubber / L.A. Averko-Antonovich [et al.] – М. : Chemistry, KolosS, 2008. – 357 p.

5. N. M. Rovkina. Chemistry and technology of polymers. Obtaining polymers by polycondensation and polymerological transformations / Rovkina, N. M. // Laboratory practice / N. M. Rovkina, A. A. Lyapkov. – Saint Petersburg : Lan, 2022. – 241 p.

6. A. E. Kornev. Technology of elastomeric materials / Kornev A.E. et al. // Moscow: NAPPA "Expired". - 2009. – 504 p.

7. Kuznetsov V.A. Practicum on high molecular weight compounds: a textbook. Voronezh: VSU Publishing House, 2014. 166 p.

8. Pham K.D. et al. Coagulation of natural rubber latex with poly-N,N'-diallyl-N,N'-dimethylammonium chloride // Izvestiya Volgograd State Technical University. 2017. No. 3. pp. 70-74.

9. Zhuravleva L.N. Technology of glued materials and wood boards. Section "Synthetic adhesives". Krasnoyarsk: SibGTU, 2013. 68 p.

10. Myakisheva A.V. The prospects of using melamine butadiene-styrene rubber from latex / A.V. Myakisheva // 75th Scientific and technical Conference of students, undergraduates and undergraduates : abstracts, April 22-27, 2024, Minsk: at 4 p.m. 2. - Minsk : BSTU, 2024. – p. 68-69.

11. Zolotov, Yu. A. Introduction to analytical chemistry : a textbook / Yu. A. Zolotov. – 3rd ed. (e-mail). – Moscow : Laboratory of Knowledge, 2024. – 266 p.

12. Poyarkova T.N. Practicum on the colloidal chemistry of latexes / Poyarkova T.N., Nikulin S.S., Pugacheva I.N., Kudrina G.V., Filimonova O.N. // [Text]: textbook. The manual is published by the Publishing House of the Academy of Natural Sciences. – 2011. – p. 124.

13. Lange K.R. Surfactants: synthesis, properties, analysis, application. St. Petersburg: Profession. - 2004. – p. 240.

14. Nikulina N.S. Isolation of styrene butadiene rubber from latex by a hybrid coagulant based on polydimethyldiallylammonium chloride and viscose fiber / Nikulina N.S., Pugacheva I.N., Misin V.M., Sannikova N.Yu., Verezhnikov V.N., Nikulin S.S. – Text: direct // Izv. vuzov. Chemistry and chemical technology. - 2021. - Vol. 64. Issue 6 – pp. 62-68.

15. Churilina E. V. New polymer systems based on N,N-dimethyl-N,N-diallylammonium chloride to improve the environmental friendliness of technology for the production of emulsion rubbers / Churilina E. L., Nikulin S. S., Nikitin K. K., Sergeev M. V. - Text: direct // V All-Russian Conference "Chemistry and Chemical technology: achievements and prospects." - 2020. – pp. 99.1-99.3.

16. Nikulina N.S. Hydrochloric acid phenazine in the technology of emulsion rubber production. / Nikulina N.S., Verezhnikov V.N., Vlasova L.A., Nikulin S.S. - Text: direct // Izv. vuzov. Chemistry and chemical technology. - 2024. - Vol. 67. Issue 1. - pp. 83-88.

17. Provotorova M.A. The prospect of using beet sugar production waste in the technology of producing oil-filled rubbers / Provotorova M.A., Nikulina N.S., Verezhnikov V.N., Nikulin S.S. – Text: direct // Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology. - 2015. - No. 4 – pp. 46-61.

Сведения об авторах

ФИО	<i>Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID(при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)</i>
Мякишева Анна Витальевна	студент-магистр, Воронежский государственный университет инженерных технологий, кафедра Промышленной экологии и техносферной безопасности, annamakiseva01@gmail.com ORCID 0009-0007-0559-6615
Моргачева Елена Андреевна	ассистент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, ассистент кафедры Промышленной экологии и техносферной безопасности, lena_morgacheva@mail.ru SPIN-код: 3615-9888 ORCID 0009-0001-0954-9978
Санникова Наталья Юрьевна	кандидат химических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, доцент кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, cnu@inbox.ru SPIN-код: 9425-8735 ORCID 000-0002-5583-2563 Scopus Autor ID 36151348400
Пугачева Инна Николаевна	доктор технических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, заведующий кафедрой Промышленной экологии и техносферной безопасности, eco-inna@ya.ru SPIN-код: 2326-8420 ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000
Никулин Сергей Саввович	доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, nikulin.nikuli@ya.ru SPIN-код: 7266-4329 ORCID 0000-0002-8141-8008 Scopus Autor ID 7006115834

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	Master's student, Voronezh State University of Engineering Technologies, department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, annamakiseva01@gmail.com ORCID 0009-0007-0559-6615
Morgacheva Elena Andreyevna	assistant, Voronezh State University of Engineering Technologies, department of Industrial Ecology and Technosphere Safety, lena_morgacheva@mail.ru SPIN-code: 3615-9888 ORCID 0009-0001-0954-9978
Sannikova Natalia Yuryevna	PhD, Assistant professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, Associate Professor of the Department of Technology of Organic Compounds and Polymer Processing, cnu@inbox.ru SPIN-code: 9425-8735 ORCID 000-0002-5583-2563 Scopus Autor ID 36151348400
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 SPIN-code: 2326-8420 ORCID 0000-0001-5850-2861 Researcher ID E-2258-2014 Scopus Autor ID 55442878000
Nikuln 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 SPIN-code: 7266-4329 ORCID 0000-0002-8141-8008 Scopus Autor ID 7006115834

статья поступила в редакцию
07.06.2025

одобрена после рецензирования
16.06.2025

принята к публикации
26.06.2025

the article was submitted
07.06.2025

approved after reviewing
16.06.2025

accepted for publication
26.06.2025

СИНТЕЗ МЕЛАНОИДИНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Владимир Михайлович Болотов¹ za.bolotova@mail.ru
Илья Николаевич Воронцов¹ vorontsoviya007@gmail.com

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

Аннотация. Изучены некоторые закономерности процесса образования меланоидиносодержащих красящих соединений при получении сахарного колера E150d с участием восстанавливающих и невосстанавливающих углеводов в присутствии сульфитных и аммонийных соединений. Показано влияние последовательности введения в реакционную массу сахарного колера гидроксида аммония и сульфита натрия, аминокислот различного строения на эффективность реакции Майяра.

Ключевые слова: сахарный колер, меланоидины, меланоидинообразование, красящие вещества, пищевые красители.

Для цитирования: Болотов В. М., Воронцов И. Н. Синтез меланоидиновых соединений для применения в пищевой промышленности // Инженерные технологии. 2025. № 2 (10). С. 93-98.

Original article

SYNTHESIS OF MELANOIDIN COMPOUNDS FOR USE IN THE FOOD INDUSTRY

Vladimir M. Bolotov¹ za.bolotova@mail.ru
Ilya N. Vorontsov¹ vorontsoviya007@gmail.com

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

Abstract. Some regularities of the process of formation of melanoidin-containing coloring compounds during the production of sugar color E150d with the participation of reducing and non-reducing carbohydrates in the presence of sulfite and ammonium compounds were studied. The effect of the sequence of introduction of ammonium hydroxide and sodium sulfite, amino acids of different structure into the reaction mass of sugar color on the efficiency of the Maillard reaction was shown.

Key words: caramel color, melanoidins, melanoidin formation, coloring agents, food colorings.

For citation: Bolotov V. M., Vorontsov I. N. Synthesis of melanoidin compounds for use in the food industry. *Ingenierne tehnologii = Engineering technologies*. 2025; (2 (10)): 93-98.

Введение

Для окраски продуктов питания в коричневый цвет различной интенсивности окраски используют меланоидиновые соединения, образующиеся в результате протекания реакции Майяра между карбонильной группой редуцирующих углеводов и аминогруппой азотсодержащих соединений (аммиак и его производные, аминокислоты, пептиды) с максимумом поглощения в электронном спектре при длине волны 610 нм [1,2].

Исследованиями установлено, что карбонильная группа восстанавливающих углеводов взаимодействует с не поделённой парой электронов аминогруппы азотистого соединения с образованием иминосоединения (основания Шиффа) после протекания реакции дегидратации. Иминосоединение мутаротирует и превращается в гликозиламин и далее в 1-

амино-1-дезоксикетозу (перегруппировка Амадори) [2].

В дальнейшем все эти промежуточные продукты подвергаются реакциям дегидратации, циклизации и конденсации с образованием интенсивно окрашенных меланоидиновых соединений [1,2].

Реакции меланоидинообразования наиболее активно протекают в щёлочной среде, так как в кислой среде химически активная аминогруппа с неподелённой парой электронов превращается в аммонийную, которая в реакцию Майяра не вступает [2].

Скорость реакций меланоидинообразования значительно возрастает при повышении концентрации реагирующих соединений, температуры и продолжительности нагревания.

Среди меланоидиносодержащих пищевых добавок важное место занимают сахарные колеры E150c и E150d, приготовленные по

«аммиачной» и «аммиачно-сульфитной» технологиям [3].

Целью проведенных исследований является изучение эффективности образования меланоидиносодержащих красящих соединений сахарного колера E150d в зависимости от кислотности среды, структуры молекул углеводов, химической активности аминокрупп различных азотсодержащих соединений.

Материал и методы исследования

Приготовление сахарного колера E150d осуществлялось следующим образом: в плоский стакан из нержавеющей стали вносилось 100 граммов сахара, добавлялись 2 мл. воды, после чего смесь подвергалась нагреванию в присутствии аммонийных и сульфитных компонентов при постоянном механическом перемешивании на электрической плите, причем стакан дополнительно изолировался асбестовым материалом.

Колеры, содержащие аминокислоты, изготавливались согласно технологии, изложенной в источнике [4].

Температура смеси контролировалась посредством ртутного термометра.

Получение колера из глюкозно-фруктозного сиропа с содержанием углеводов 70% проводилось аналогичным способом, принимая во внимание содержание воды в сиропе [5].

Концентрация окрашивающих меланоидиновых веществ в готовом продукте определялась спектрофотометрически на приборе с длиной волны 610 нм и толщиной светопропускающего слоя 10 мм [6].

Содержание сухих веществ изучали на рефрактометре ИРФ-454 Б2М.

Концентрацию гидроксиметилфурфуrolа в приготовленных сахарных красителях измеряли путем регистрации спектра поглощения в ультрафиолетовом диапазоне, после чего отмечали максимум поглощения, характерный для гидроксиметилфурфуrolа [7,8].

Результаты исследования и их обсуждение

Введение в состав сахарного колера E150d аммонийных и сульфитных солей способствует увеличению цветности красителя с учетом наличия в рецептуре углеводов с восстанавливающими (глюкозно-фруктозный сироп) или невосстанавливающими (сахароза) свойствами (таблица 1, рецептуры 1 и 2).

Таблица 1. Влияние строения углеводов и солей на интенсивность образования красящих веществ сахарного колера E150d

Table 1. The effect of the structure of carbohydrates and salts on the intensity of the formation of coloring substances of sugar color E150d

№ п/п	Рецептуры сахарного колера E150d / Formulations of sugar color E150d		Оптическая плотность при длине волны 610 нм в кювете с толщиной оптического слоя 10 мм. 0,1% раствора сахарного колера / Optical density at a wavelength of 610 nm in a cuvette with an optical layer thickness of 10 mm. 0.1% sugar color solution
	Названия солей и их содержание / Names of salts and their contents	Название углеводов и их количество / The name of carbohydrates and their quantity	
1	Карбонат аммония – 0,05% Сульфат аммония – 0,06%	Сахароза-100 г. с добавлением 2% воды	0,05
2	Сульфит натрия – 0,06%		
3	Сульфит аммония – 0,12% Сульфит натрия – 0,06%	Глюкозно-фруктозный сироп (70%) -143 г.	0,34

Однако, проведенные исследования показывают, что интенсивность образования красящих веществ зависит не только от строения углевода, но и от строения кислотного остатка аммонийной соли.

Например, замена разлагающегося при нагревании в условиях получения сахарного

колера карбоната аммония более термостабильным сульфатом аммония увеличивает содержание катиона аммония и, соответственно, красящих веществ в реакционной массе, несмотря на увеличение кислотности раствора углеводов (таблица 1, рецептуры 2 и 3).

Согласно исследованиям, последовательность внесения меланоидинообразующих аммонийных соединений, представленных гидроксидом аммония, и сульфитных солей, обла-

дающих восстановительным и нуклеофильным действием (сульфит натрия), оказывает влияние на степень интенсивности формирования окрашенных соединений. (таблица 2).

Таблица 2. Влияние способов получения аммиачно-сульфитных сахарных колеров E150d из глюкозно-фруктозного сиропа на основные физические показатели

№ п/п	Наименование показателя / Naming of the indicator	Значение показателя / The value of the indicator	
		Колер 1 / Color 1	Колер 2 / Color 2
1	Плотность при 20 °С, г/см ³	1,36	1,34
2	Массовая доля сухих веществ, %	75,00	70,00
3	Содержание красящих веществ, оптическая единица плотности 0,1% раствора колера в кювете с толщиной оптического слоя 10 мм при длине волны 610 нм	0,32	0,15

Первоначальное введение в реакционную массу глюкозно-фруктозного сиропа гидроксида аммония способствует его максимальному взаимодействию с карбонильными группами углеводов в щелочной среде с образованием меланоидинов в присутствии сернистых соединений (таблица 2, колер 1).

Последовательное введение сначала сульфита натрия, а затем гидроксида аммония в глюкозно-фруктозный сироп способствует снижению концентрации красящих веществ

(таблица 2, колер 2), по-видимому из-за блокирования в растворе карбонильных групп углеводов гидросульфитом натрия, образующимся при гидролизе сульфита натрия.

Также следует учитывать количество вводимых в реакционную массу сульфитных соединений, поскольку это приводит к увеличению содержания гидроксиметилфурфурола и уменьшению образования красящих веществ (рисунок 1, 2).

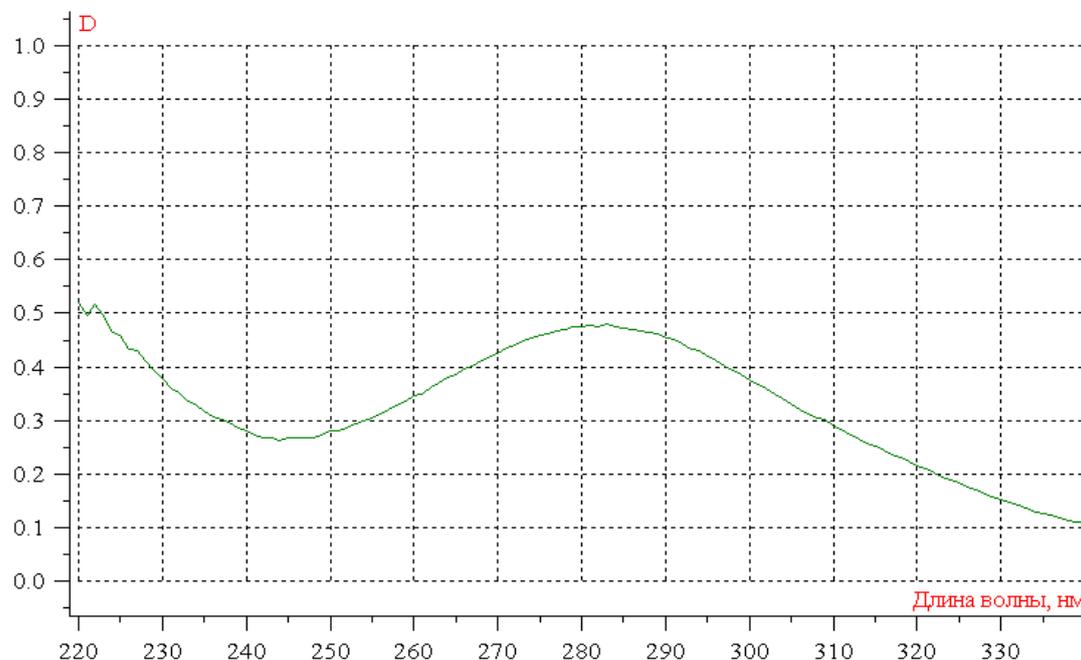


Рисунок 1. Ультрафиолетовый спектр сахарного колера, модифицированного 1% сульфитом натрия, характеризуется максимумом поглощения (λ_{max}) при 285 нм и соответствующим значением оптической плотности (A) равным 0,4805

Figure 1. The ultraviolet spectrum of sugar color modified with 1% sodium sulfite is characterized by an absorption maximum (λ_{max}) at 285 nm and a corresponding optical density (A) of 0.4805.

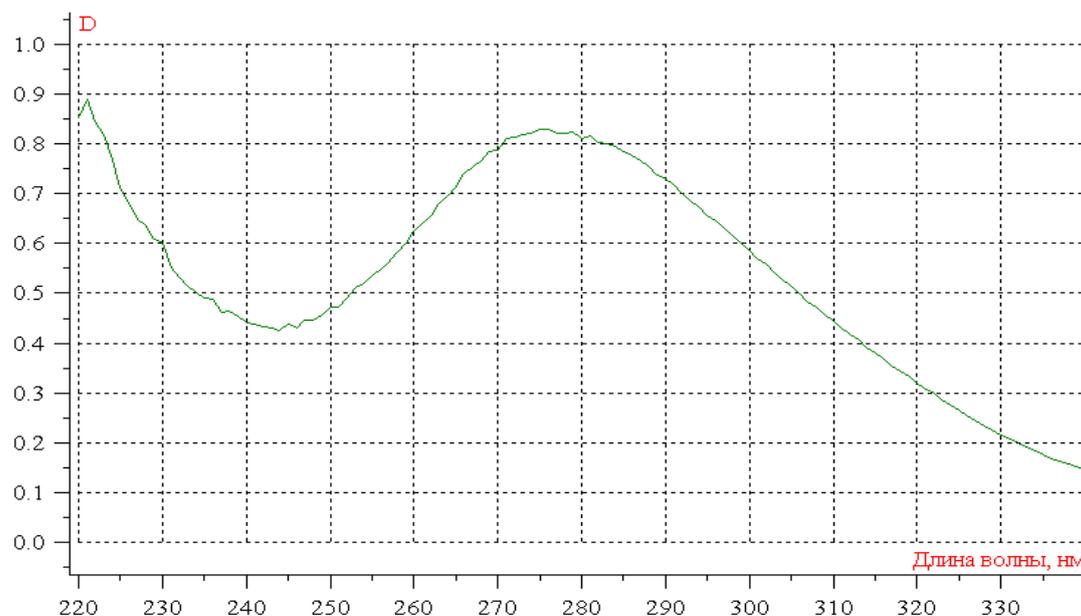


Рисунок 2. Ультрафиолетовый спектр сахарного колера, модифицированного добавлением 2% сульфита натрия, характеризуется выраженным максимумом поглощения при $\lambda_{max} = 285$ нм. Коэффициент оптической плотности, соответствующий этому максимуму, равен $A = 0,7733$

Figure 2. The ultraviolet spectrum of sugar color modified by the addition of 2% sodium sulfite is characterized by a pronounced absorption maximum at $\lambda_{max} = 285$ nm. The optical density coefficient corresponding to this maximum is $A = 0.7733$

При использовании гидроксида аммония надо иметь ввиду, что аммиак обладает не только высокими нуклеофильными свойствами по отношению к карбонильной группе углеводов, но и высокими основными свойствами по отношению к протонизированному водороду α -СН-связи молекулы углевода по Фишеру, что

способствует протеканию реакций енолизации и изомеризации.

Введение в рецептуру сахарного колера менее основных аминогрупп в виде аминокислот повышает скорость нуклеофильной реакции и способствует образованию красящих веществ (таблица 3).

Таблица 3. Основные физические показатели сахарных колеров E150d с аминокислотами различного строения

Table 3. Main physical parameters of E150d sugar colors with amino acids of various structures

№ п/п	Наименование показателя / Naming of the indicator	Значение показателя / The value of the indicator	
		Глицин / Glycine	β -аланин / β -alanine
1	Плотность при 20 °С, г/см ³	1,37	1,35
2	Массовая доля сухих веществ, %	85,00	83,00
3	Содержание красящих веществ, оптическая единица плотности 0,1% раствора колера в кювете с толщиной оптического слоя 10 мм при длине волны 610 нм	0,45	0,41

Данные, представленные в таблице 3, демонстрируют, что более высокая химическая активность аминогруппы глицина, связанной в аминокислоте с первичным углеводородным радикалом, приводит к формированию большего объема красящих веществ в сахарном ко-

лере, нежели менее активная аминогруппа β -аланина, связанная в молекуле аминокислоты со вторичным углеводородным радикалом.

Выводы

Таким образом, проведенные исследования показывают, что эффективность образования меланоидиновых красящих веществ в составе сахарных колеров E150d зависит от структуры молекул углеводов, химического со-

става сульфитных солей, реакционной активности аминогруппы аммониевых соединений и последовательности введения солей в реакционную массу, определяющей характер протекающих реакций.

Литература

1. Селеменев, В.Ф. Меланоидины [Текст]: монография / В.Ф. Селеменев; Воронеж. гос. ун-т. – Воронеж: ВГУ, 2004. – 195 с.
2. Щербань, А.И. Химия углеводов и свеклосахарного производства [Текст]: учеб. пособие / А.И. Щербань, В.М. Болотов, В.А. Голыбин; Воронеж. гос. технолог. ун-т. – Воронеж: ВГТА, 2009. – 90 с.
3. Болотов, В.М. Пищевые красители: классификация, свойства, анализ, применение [Текст] / В. М. Болотов, А. П. Нечаев, Л. А. Сарафанова. – СПб: ГИОРД, 2008. – 240 с.
4. Патент РФ на изобретение №279833. «Способ получения аммиачно-сульфитного сахарного колера с повышенным содержанием красящих веществ». Болотов В.М., Воронцов И.Н., Саввин П.Н., Комарова Е.В., Богданов А.В. Заявл. 07.07.22. Оpubл. 29.05.23. Бюл. 16.
5. Абакаров, Г. М. Приготовление и анализ натурального пищевого красителя (карамельного колера) E 150 a / Г. М. Абакаров, А. И. Арсланбеков // Повышение качества и безопасности пищевых продуктов. – Махачкала : Алеф, 2015. – С. 161-164.
6. Колчева, Р. А. Красящие вещества и их влияние на качество сахара / Р. А. Колчева, А. Р. Сапронов. – Москва : Пищевая промышленность, 1975. – 346 с.
7. Корячкина, С. Я. Научные основы производства продуктов питания / С. Я. Корячкина, О. М. Пригарина. – Орел : ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», 2011. – 381 с.
8. Лоретц, О. Г. Актуальность применения натуральных пищевых красителей в хлебопечении / О. Г. Лоретц, Н. Л. Лопаева, О. П. Неверова // Аграрный вестник Урала. – 2016. – № 12. – С. 52-56.

References

1. Selemeney, V.F. Melanoidins [Text]: monograph / V.F. Selemeney; Voronezh. State University. - Voronezh: VSU, 2004. - 195 p.
2. Shcherban, A.I. Chemistry of coal producers and sugar beet production [Text]: textbook / A.I. Shcherban, V.M. Bolotov, V.A. Golybin; Voronezh. State technological University. - Voronezh: VSTA, 2009. - 90 p.
3. Bolotov, V.M. Food colors: classification, properties, analysis, application [Text] / V. M. Bolotov, A. P. Nechaev, L. A. Sarafanova. – SPb: GIORД, 2008. – 240 p.
4. Russian Federation Patent for Invention No. 279833. “Method for Obtaining Ammonium Sulfite Caramel Color with Increased Content of Coloring Agents”. Bolotov V.M., Vorontsov I.N., Savvin P.N., Komarova E.V., Bogdanov A.V. Claimed 07.07.22. Published 29.05.23. Bulletin 16.
5. Abakarov, G. M. Preparation and analysis of natural food coloring (caramel color) E 150 a / G. M. Abakarov, A. I. Arslanbekov // Improving the quality and safety of food products. - Makhachkala: Alef, 2015. - P. 161-164.
6. Kolcheva, R. A. Coloring agents and their influence on the quality of sugar / R. A. Kolcheva, A. R. Sapronov. - Moscow: Food industry, 1975. - 346 p.
7. Koryachkina, S. Ya. Scientific foundations of food production / S. Ya. Koryachkina, O. M. Prigarina. - Orel: FGBOU HPE "State University-UNPK", 2011. - 381 p.
8. Loretts, O. G. Relevance of the use of natural food colors in bakery / O. G. Loretts, N. L. Lopayeva, O. P. Neverova // Agrarian Bulletin of the Urals. - 2016. - No. 12. - P. 52-56.

Сведения об авторах

ФИО	Сведения (ученая степень, звание, Email, ORCID (при наличии) и другие международные идентификационные номера авторов)
Болотов Владимир Михайлович	доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», профессор кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, za.bolotova@mail.ru SPIN-код 9943-8965
Воронцов Илья Николаевич	аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», аспирант кафедры Технологии органических соединений и переработки полимеров, vorontsovilya007@gmail.com SPIN-код: 3861-8346

Authors information

Last name, first name, patronymic	Information (academic degree, title, Email, ORCID (if available) and other international identification numbers of the authors)
Bolotov Vladimir Mikhailovich	DSc, professor, Voronezh state university of engineering technologies, professor of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, za.bolotova@mail.ru SPIN-code 9943-8965
Vorontsov Ilya Nikolaevich	graduate student, Voronezh state university of engineering technologies, graduate student of the department of Technology of organic compounds and polymer processing, vorontsovilya007@gmail.com SPIN-code: 3861-8346

статья поступила в редакцию 21.05.2025	одобрена после рецензирования 16.06.2025	принята к публикации 25.06.2025
the article was submitted 21.05.2025	approved after reviewing 16.06.2025	accepted for publication 25.06.2025

