

18+

vek21.penzgtu.ru

ISSN 2221-951X

XXI ВЕК : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО

ПЛЮС



2025

№4(72) Т.14





XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Главный редактор

Шеуджен Асхад Хазретович, академик Российской академии наук,
доктор биологических наук, профессор

Заместители главного редактора:

Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент
Ефремова Саня Юнусовна, доктор биологических наук, профессор
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент
Пащенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор
Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор
Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент

Редакционная коллегия:

Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор
Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор
Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор
Бакин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор
Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор
Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор
Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор
Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор
Голуб Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор
Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор
Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент
Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент
Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент
Зыбина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент
Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор
Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор
Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор
Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор
Куликовских Илона Марковна, доктор технических наук, доцент
Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор
Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор
Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор
Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор
Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор
Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор
Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук
Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор
Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор
Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор
Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент
Черный Константин Анатольевич, доктор технических наук, доцент
Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент

Ответственный секретарь

Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

© ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», 2025

Основан в 2011 г.

18+

Том 14
№ 4 (72)
2025

Журнал выходит
4 раза в год

Входит в ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Зарегистрирован Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций по Пензенской области ПИ № ТУ 58 – 00243 от 27 апреля 2015 года.

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

Адрес редколлегии, учредителя,
редакции и издателя
ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный технологический
университет»:
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, д. 1а/11
Тел.: 8(8412) 20-86-39;
E-mail: journal21@penzgtu.ru;
Сайт: <https://vek21.penzgtu.ru>

Подписано в печать 19.12.2025.

Выход в свет 26.12.2025.

Формат 60X84 1/8

Печать ризография.

Усл. печ. л. 26,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 355.

Отпечатано в ПензГТУ,
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, д. 1а/11, тел.: 8(8412) 20-86-39
Цена свободная

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

Шеуджен Асхад Хазретович, академик Российской академии наук, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой агрохимии
(Кубанский государственный аграрный университет)

Заместители главного редактора:

Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Пищевые производства»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела пищевых систем и биотехнологий, главный научный сотрудник
(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)

Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия)

Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Биомедицинская инженерия»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Редакционная коллегия:

Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»
(Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

Антипов Сергей Тихонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств» (Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия)

Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор, директор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия)

Бакин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессов и аппаратов перерабатывающих производств» (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева г. Москва, Россия)

Баширов Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» (Уфимский государственный нефтяной технический университет (филиал в г. Салават), Институт нефтепереработки и нефтехимии, г. Салават, Россия)

Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» (Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия)

Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор
(Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан)

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела инженерной экологии и экологического мониторинга Самарского научного центра РАН, заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология» (Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)

Голуб Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела пищевых систем и биотехнологий (Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)

Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, директор института автоматизации и информационных технологий (Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия)

Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и организация общественного питания» (Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)

Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам
(Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Челябинск, Россия)

Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника» (Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)

Зыбина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника по научной работе (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия)

Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, директор Передовой медицинской инженерной школы (*Самарский государственный медицинский университет, г. Самара, Россия*)

Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика» (*Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия*)

Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» (*Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия*)

Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующий кафедрой «Промышленная экология» (*Российский государственный химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия*)

Куликовских Илона Марковна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий (*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия*)

Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор, заместитель директора (*Институт Нефтехимических процессов НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан*)

Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор (*Международный государственный экологический институт им.А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета, г.Минск, Республика Беларусь*)

Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор, директор (*Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г.Грозный, Чеченская Республика*)

Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры бионанотехнологии (*Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия*)

Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» (*Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия*)

Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования (*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия*)

Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» (*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, г. Самара, Россия*)

Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры пищевой инженерии (*Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия*)

Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра Академия гражданской защиты (*Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия*)

Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, управляющий директор ГНЦ РФ «Государственный ордена Трудового Красного Знамени НИИ химии и технологии элементоорганических соединений», профессор кафедры химии и технологии элементоорганических соединений (*Московский институт тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*)

Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная безопасность» (*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности, г. Санкт-Петербург, Россия*)

Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность» (*Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия*)

Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность» (*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия*)

Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерные системы» (*Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия*)

Черный Константин Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» (*Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия*)

Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии питания (*Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия*)

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО: ДОРОЖНАЯ КАРТА ПЕРЕХОДА ОТ ИНДУСТРИИ 3.0 К ИНДУСТРИИ 5.0 Шайхулова Айгуль Фазировна.....	10
ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ КОНВЕЙЕРА <i>DEVSECOPS</i> ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ <i>CI/CD</i> Чигирева Ирина Валерьевна, Егорова Екатерина Сергеевна, Федотов Никита Дмитриевич.....	21
АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ВЫПУКЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НА МАТРИЧНЫХ ШТРИХКОДАХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЛИС Епифанов Александр Сергеевич.....	31
КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ: МЕТОДЫ АНАЛИЗА, СИНТЕЗА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ Поляков Николай Александрович.....	41
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА <i>Q</i>-ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАСПИСАНИЙ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ДИСКРЕТНОГО ТИПА ПРОИЗВОДСТВА Обухов Константин Олегович, Квятковская Ирина Юрьевна, Попов Георгий Александрович, Карлина Елена Прокофьевна.....	48
МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ С ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ НАГРУЗКИ В СРЕДАХ С КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИЕЙ Чемашкин Федор Юрьевич, Устинов Сергей Михайлович.....	58
СБОР ДАННЫХ И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРЕДСКАЗАНИЯ СВЯЗЕЙ В СОЦИАЛЬНЫХ ГРАФАХ Мартышкин Алексей Иванович, Зупарова Валентина Владимировна, Панфилова Марина Ивановна.....	66
К РАЦИОНАЛЬНОМУ ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОЙ МОДЕЛИ СЦЕНАРИЕВ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ Дубовский Сергей Викторович, Иванов Сергей Александрович.....	76
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫМИ МЕТОДАМИ Карпухин Эдуард Владимирович.....	82
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ Бикташев Равиль Айнулович, Никитин Даниил Дмитриевич, Семёнов Андрей Олегович.....	88
ВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ОБУЧАЕМЫХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПО АЛГОРИТМУ ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОШИБКИ, ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ИХ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ Ушенина Инна Владимировна.....	98

АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРАВИЛ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ИЗ ТЕКСТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ Головнин Олег Константинович, Чекина Елена Владимировна, Шестакова Мария Владимировна.....	107
---	-----

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ РАЗДЕЛОВ РАБОЧИХ ПРОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И RAG Гудков Кирилл Владимирович, Шириков Роман Сергеевич.....	114
---	-----

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

РАЗРАБОТКА НАПИТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЯБЛОЧНОГО СОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛЬГИНАТНОЙ СФЕРИФИКАЦИИ <i>RIBES NIGRUM</i> Лазарев Владимир Александрович, Порошина Дарья Денисовна.....	121
---	-----

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗЕРНОВЫХ И БОБОВЫХ КУЛЬТУР В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ Фролова Нина Анатольевна.....	128
---	-----

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ ГОДНОСТИ НАПИТКОВ Багмут Юлия Николаевна, Кокорева Лариса Анатольевна, Заворохина Наталия Валерьевна.....	133
--	-----

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ И УПРАВЛЕНИЮ РИСКОМ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ Бызов Антон Прокопьевич.....	139
--	-----

СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК <i>YSZ</i> ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ЛИТЕЙНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ Храпко Наталья Николаевна, Патрушева Тамара Николаевна, Мякин Сергей Владимирович.....	147
---	-----

ВЗАИМОКОНТРОЛЬ КАК ФАКТОР БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОГО ВООРУЖЕНИЯ ВЕРТОЛЕТОВ Савельев Андрей Иванович.....	153
--	-----

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ Кулешов Владимир Владимирович, Богданов Андрей Владимирович.....	159
---	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЧУГУНА Месхи Бесарион Чохоевич, Джедиров Дмитрий Александрович, Булыгин Юрий Игоревич.....	164
--	-----

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕТЕРМИНИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСОВ ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕСОВ САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КАРТЫ КОХОНЕНА Таранцева Клара Рустемовна, Патрикеев Денис Николаевич, Козодаев Алексей Станиславович.....	170
---	-----

РАДОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ НА ШАХТАХ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА Коршунов Геннадий Иванович, Мироненкова Наталья Александровна, Полешук Анастасия Андреевна.....	177
---	-----

ПРЕДСМЕННАЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА РАБОТНИКОВ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ Захарова Елена Анатольевна, Бурцева Мария Юрьевна, Мурко Елена Викторовна.....	184
--	-----

**МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ МОДЕЛИРОВАНИЯ
УТЕЧЕК БЫТОВОГО ГАЗА В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ**

Тимошенко Артем Леонидович, Булатов Вячеслав Олегович, Агафонов Алексей Викторович.....193

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Закирова Альфия Резавановна.....202

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, СВЯЗАННЫХ
С ТРАНСПОРТОМ, НА ПЕРЕКРЕСТКАХ БИШКЕКА**

Алсеитов Мирлан Тилегенович, Политаева Наталья Анатольевна,
Чусов Александр Николаевич.....208

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОЛИГОНОВ
ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Кошелев Алексей Васильевич, Тихомирова Елена Ивановна,
Атаманова Ольга Викторовна, Алексашин Антон Вячеславович.....214

CONTENT
INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING

THE FUTURE ENGINEERING DESIGNING: A ROADMAP FOR THE TRANSITION FROM INDUSTRY 3.0 TO INDUSTRY 5.0 Shaykholova Aygul Fazirovna.....	10
PRACTICAL ASPECTS OF CREATING A DEVSECOPS PIPELINE FOR AUTOMATING CI/CD PROCESSES Chigireva Irina Valerievna, Egorova Ekaterina Sergeevna, Fedotov Nikita Dmitrievich.....	21
ALGORITHM FOR CORRECTION OF CONVEX SPHERICAL DISTORTIONS IN MATRIX BARCODES FOR IMPLEMENTATION ON FPGA Epifanov Alexander Sergeevich.....	31
A CONCEPTUAL MODEL OF THE ORGANIZATIONAL PROCESSES OF A DIGITAL TELECOMMUNICATIONS COMPANY: METHODS OF ANALYSIS, SYNTHESIS AND INTELLECTUAL SUPPORT OF MANAGEMENT DECISIONS Poliakov Nikolai Alexandrovich.....	41
EXPERIMENTAL STUDY OF THE Q-LEARNING METHOD IN THE CONSTRUCTION OF PRODUCTION SCHEDULES FOR DISCRETE MANUFACTURING ENTERPRISES Obukhov Konstantin Olegovich, Kvyatkovskaya Irina Yurievna, Popov Georgy Alexandrovich, Karlina Elena Prokofievna.....	48
MODEL OF ADAPTIVE SCALING FOR CLOUD-BASED CONTAINERIZED APPLICATIONS BASED ON PID CONTROLLERS WITH A PREDICTIVE LOAD MODEL IN CONTAINERIZED VIRTUALIZATION ENVIRONMENTS Chemashkin Fedor Yurievich, Ustinov Sergey Mikhailovich.....	58
DATA COLLECTION AND PRELIMINARY ANALYSIS IN THE DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF MACHINE LEARNING METHODS IN PREDICTING LINKS IN SOCIAL GRAPHS Martyshkin Alexey Ivanovich, Zuparova Valentina Vladimirovna, Panfilova Marina Ivanovna.....	66
TOWARDS A RATIONAL CHOICE OF A SET-THEORETICAL MODEL PARAMETERS FOR FOREST MANAGEMENT SCENARIOS Dubovskii Sergei Viktorovich, Ivanov Sergei Alexandrovich.....	76
INFORMATION SYSTEM FOR RESEARCH OF MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCERS BY COMPUTER METHODS Karpukhin Eduard Vladimirovich.....	82
COMPARATIVE ANALYSIS OF TIME-SPLIT PLANNING ALGORITHMS FOR MULTIPROCESSOR SYSTEMS BY MEANS OF SIMULATION MODELLING BASED ON PETRI NETS Biktashev Ravil Ainulovich, Nikitin Daniil Dmitrievich, Semenov Andrei Olegovich.....	88
TIMING MODELS OF NEURAL NETWORKS TRAINED IN REAL TIME USING THE BACKPROPAGATION ALGORITHM FOR SUPPORTING THEIR HARDWARE IMPLEMENTATION Ushenina Inna Vladimirovna.....	98
ALGORITHM FOR EXTRACTING RULES FROM TECHNICAL STANDARDS IN ROAD TRAFFIC ORGANIZATION Golovnin Oleg Konstantinovich, Chekina Elena Vladimirovna, Shestakova Maria Vladimirovna.....	107

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR GENERATION OF WORK PROGRAM SECTIONS USING LANGUAGE MODELS AND RAG	
Gudkov Kirill Vladimirovich, Shirikov Roman Sergeevich.....	114

FOOD TECHNOLOGY

DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL DRINK BASED ON APPLE JUICE USING ALGINATE SPHERIFICATION <i>RIBES NIGRUM</i>	
Lazarev Vladimir Alexandrovich, Poroshina Darya Denisovna	121

USE OF CEREALS AND LEGUMINOUS CROPS IN FOOD SYSTEMS	
Frolova Nina Anatolyevna.....	128

APPLICATION OF HIGH HYDROSTATIC PRESSURE (HPP) TECHNOLOGY TO EXTEND THE SHELF LIFE OF BEVERAGES	
Bagmut Yulia Nikolaevna, Kokoreva Larisa Anatolyevna, Zavorokhina Natalia Valerievna.....	133

TECHNOSPHERE SAFETY

ABOUT THE UPDATED CALCULATION OF IRRIGATION DEVELOPMENT OF APPROACHES TO RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT IN JUSTIFYING THE SAFETY OF EXPLOSION AND FIRE HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITIES	
Byzov Anton Prokop'evich.....	139

PROPERTIES OF OXIDE FILMS <i>YSZ</i> FOR HEAT-BARRIER SCREENS IN FOUNDRY AND HEAT-TREATING WORKSHOPS	
Khrapko Natalya Nikolaevna, Patrusheva Tamara Nikolaevna, Myakin Sergey Vladimirovich.....	147

MUTUAL MONITORING AS A SAFETY FACTOR IN THE EXPLOITATION OF HELICOPTER WEAPONS	
Savelev Andrey Ivanovich.....	153

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE LEVEL OF SAFETY CULTURE	
Kuleshov Vladimir Vladimirovich, Bogdanov Andrey Vladimirovich.....	159

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF NOISE GENERATION DURING MILLING OF CAST IRON	
Meskhii Besarion Chokhovich, Dzhedirov Dmitry Aleksandrovich, Bulygin Yuri Igorevich.....	164

PREDICTION OF THE DETERMINING PARAMETERS OF EMISSIONS FROM STATIONARY SOURCES USING KOHONEN SELF-ORGANIZING MAP WEIGHTS	
Tarantseva Klara Rustemovna, Patrikeev Denis Nikolayevich, Kozodaev Alexey Stanislavovich.....	170

RADON MONITORING AT THE MINES OF THE KUZNETSK COAL BASIN	
Korshunov Gennady Ivanovich, Mironenkova Natalia Alexandrovna, Poleshchuk Anastasia Andreevna.....	177

MONITORING OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL ADAPTATION OF WORKERS AT DANGEROUS PRODUCTION FACILITIES	
Zakharova Elena Anatolyevna, Burtseva Maria Yurievna, Murko Elena Viktorovna.....	184

METHOD FOR OPTIMIZING THE COMPUTATIONAL TIME OF DOMESTIC GAS LEAK SIMULATIONS IN RESIDENTIAL BUILDINGS	
Timoshenko Artem Leonidovich, Bulatov Vyacheslav Olegovich, Agafonov Alexey Viktorovich.....	193

APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF DIRECT CURRENT ELECTRICAL ENERGY Zakirova Alfia Rezavanovna.....	202
SPATIAL ANALYSIS OF TRANSPORT-RELATED POLLUTANTS AT THE INTERSECTIONS OF BISHKEK Alseitov Mirlan Tilegenovich, Politaeva Natalia Anatolyevna, Chusov Alexander Nikolaevich.....	208
MODERN TECHNOLOGICAL SOLUTIONS TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE LIQUIDATION OF SOLID MUNICIPAL WASTE LANDFILLS Koshelev Alexey Vasilievich, Tikhomirova Elena Ivanovna, Atamanova Olga Viktorovna, Aleksashin Anton Vyacheslavovich.....	214

УДК 65.011.56
EDN: AUKQTA

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА БУДУЩЕГО: ДОРОЖНАЯ КАРТА ПЕРЕХОДА ОТ ИНДУСТРИИ 3.0 К ИНДУСТРИИ 5.0

© Автор(ы) 2025
SPIN: 5174-2258
AuthorID: 1030492
ORCID: 0000-0002-3340-3880
ResearcherID: A-0000-0000
ScopusID: 57361028400

ШАЙХУЛОВА Айгуль Фазировна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Авиационные двигатели»
Уфимский университет науки и технологии
(450076, Россия, Уфа, улица Заки Валиди, 32, e-mail: shaihulova@inbox.ru)

Аннотация. Настоящая работа посвящена вопросам цифровой трансформации и автоматизации отечественного машиностроительного производства, которое находится в настоящее время на уровне Индустрии 3.0, тогда как мировой тренд смещается к парадигмам 4.0 и 5.0. Целью настоящей работы были разработка комплексной методики технологического аудита и дорожной карты перехода от концепции Индустрии 3.0 к концепции Индустрии 5.0. В работе был проведен анализ существующей отчетов международных консалтинговых агентств и отчетов крупных корпораций, на основании которого дается оценка уровня роботизации и цифровой зрелости компаний, выявлены ключевые барьеры на пути модернизации, проведена экономическая оценка проектов автоматизации и цифровизации. В работе были сделаны выводы и комментарии по проведенной статистике, для обоснования достоверности и оригинальности приведена статистика источников данных. На основе проведенного анализа и с использованием методологии *IDEF0* построены функциональные модели предприятия 3.0 (*as-is*) и целевая человеко-центричная модель Индустрии 5.0 (*to-be*). Анализ полученных функциональных моделей позволил разработать комплексную методику технологического аудита и поэтапную дорожную карту цифровой трансформации. В качестве сравнения предлагаемых методик и дорожной карты трансформации были рассмотрены примеры успешных проектов цифровой трансформации крупных предприятий (*Siemens, Tesla, Airbus*), которые демонстрируют эффективность внедрения цифровых двойников, сквозной автоматизации и *PLM*-систем. Подчеркивается, что переход к Индустрии 5.0 требует не только технологических инвестиций, но и изменения стратегических подходов к управлению человеческим капиталом и его развитию.

Ключевые слова: Индустрия 5.0, цифровая трансформация, дорожная карта, машиностроительное производство, функциональное моделирование, *IDEF0*, аудит, устойчивое развитие, человеко-ориентированный подход.

THE FUTURE ENGINEERING DESIGNING: A ROADMAP FOR THE TRANSITION FROM INDUSTRY 3.0 TO INDUSTRY 5.0

© The Author(s) 2025

SHAYKHULOVA Aygul Fazirovna, candidate of technical sciences, ass. professor of «Aviation Engines»
Ufa University of Science and Technologies
(450076, Russia, Ufa, street Zaki Vakidi 32, e-mail: shaihulova@inbox.ru)

Abstract. This paper examines the digital transformation and automation of the domestic mechanical engineering industry, which currently ranks at the Industry 3.0 level, while the global trend is shifting toward the 4.0 and 5.0 paradigms. The aim of this paper was to develop a comprehensive methodology for a technology audit and a roadmap for the transition from Industry 3.0 to Industry 5.0. The paper analyzed existing reports from international consulting agencies and large corporations, which served to assess the level of robotics and digital maturity of companies, identify key barriers to modernization, and conduct an economic evaluation of automation and digitalization projects. Conclusions and comments were drawn from the statistical data collected, and statistics from data sources were provided to substantiate its reliability and originality. Based on the analysis and the *IDEF0* methodology, functional models of enterprise 3.0 (*as-is*) and a target human-centric model of Industry 5.0 (*to-be*) were constructed. An analysis of the resulting functional models enabled the development of a comprehensive technology audit methodology and a step-by-step digital transformation roadmap. To compare the proposed methods and the transformation roadmap, examples of successful digital transformation projects at large enterprises (*Siemens, Tesla, Airbus*) were considered, demonstrating the effectiveness of implementing digital twins, end-to-end automation, and *PLM* systems. It is emphasized that the transition to Industry 5.0 requires not only technological investments but also a shift in strategic approaches to human capital management and development.

Keywords: Industry 5.0, digital transformation, roadmap, mechanical engineering, functional modeling, *IDEF0*, audit, sustainable development, human-centered approach.

Для цитирования: Шайхулова А.Ф. Проектирование машиностроительного производства будущего: дорожная карта перехода от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 / А.Ф. Шайхулова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 10-20. – EDN: AUKQTA.

Введение. Уровень оснащённости современного отечественного машиностроения характеризуется значительной неоднородностью: в то время как ведущие компании внедряют элементы Индустрии 4.0, большинство предприятий остаются на этапе Индустрии 3.0 (автоматизация отдельных процессов на основе PLC-контроллеров, разрозненные данные, слабая горизонтальная интеграция). Парадигма Индустрии 5.0 предлагает не просто технологический апгрейд, а стратегический вектор развития, позволяющий:

- создать бизнес-модели, устойчивые к глобальным потрясениям;
- повысить привлекательность производства для молодых кадров;
- выйти на рынки с высокой добавленной

стоимостью через гипер-кастомизацию;

- снизить экологическую нагрузку и затраты на энергию.

Переход от уровня 3.0 к 4.0 и 5.0 не может быть скачкообразным, это эволюционный путь, требующий поэтапной стратегии. Концепция современного предприятия в парадигме Индустрии 5.0 предполагает фундаментальный сдвиг от чисто технологической и экономической модели к модели, ориентированной на человека с упором на нематериальные ценности. Основной концепт Индустрии 4.0 – «умные» заводы на базе киберфизических систем, *IoT*, больших данных, *AI*, принципиальное отличие Индустрии 5.0 – интеллектуальные производственные технологии (рис. 1, табл. 1).



Рисунок 1 – Ключевые принципы и технологии Индустрии 4.0 и 5.0

Таблица 1 – Сравнение концепций Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0

Цель	Максимизация эффективности, прибыли, автоматизация	Устойчивое развитие, благополучие человека, кастомизация
Роль человека	Источник ошибок, подлежащий устранению	Ключевой элемент, источник креативности, ценности и принятия решений
Технологии	IoT, AI, Big Data, роботизация	Коботы, ИИ-ассистенты, цифровые двойники (для безопасности человека), биотехнологии, генеративный дизайн
Производство	Массовое, гибкое	Гипер-кастомизация, совместное создание (co-creation) с клиентом
Цепочка создания ценности	Глобальная, оптимизированная по стоимости	Устойчивая, региональная/локальная (где возможно), прозрачная
Ключевой показатель	ROI (Return on Investment), OEE (Overall Equipment Effectiveness)	ROV (Return on Value) – возврат ценности для общества, ESG-показатели (Environmental, Social, Governance)
Роль человека	Источник ошибок, подлежащий устранению	Ключевой элемент, источник креативности, ценности и принятия решений

Настоящая работа ставит своей целью разработать дорожную карту модернизации производства для обеспечения технологического сдвига в сторону Индустрии 5.0. Для достижения этой цели решается ряд задач:

1. Анализ существующего уровня автоматизации и цифровизации и оценка технико-экономических аспектов соответствующих проектов (методика описана в следующем разделе).

2. Разработка функциональных моделей предприятий «*as-is*» и «*as-to-be*».

3. На основании проведенных аналитики и моделирования разработка собственно дорожной карты модернизации производства.

Научная новизна настоящей работы определяется новыми функциональными моделями, дорожной картой и проведенным аналитическим

исследованием.

Методология. Для оценки текущего состояния вещей анализируются два ключевых аспекта – оснащенность промышленности роботами (объективный показатель автоматизации) и уровень использования цифровых технологий. С этой целью следует рассмотреть распределение компаний по уровню цифровой зрелости, в том числе уровню внедрения цифровых технологий (по данным официальной статистики). Для выявления основных барьеров на пути к модернизации проанализируем основные проблемы освоения цифровых технологий по данным официальных источников [1-15] (рис. 2-6). Для обоснования приведенной далее статистики на рисунке 2 показано распределение по типам использованных для анализа источников. Эти источники отражены в списке литературы.

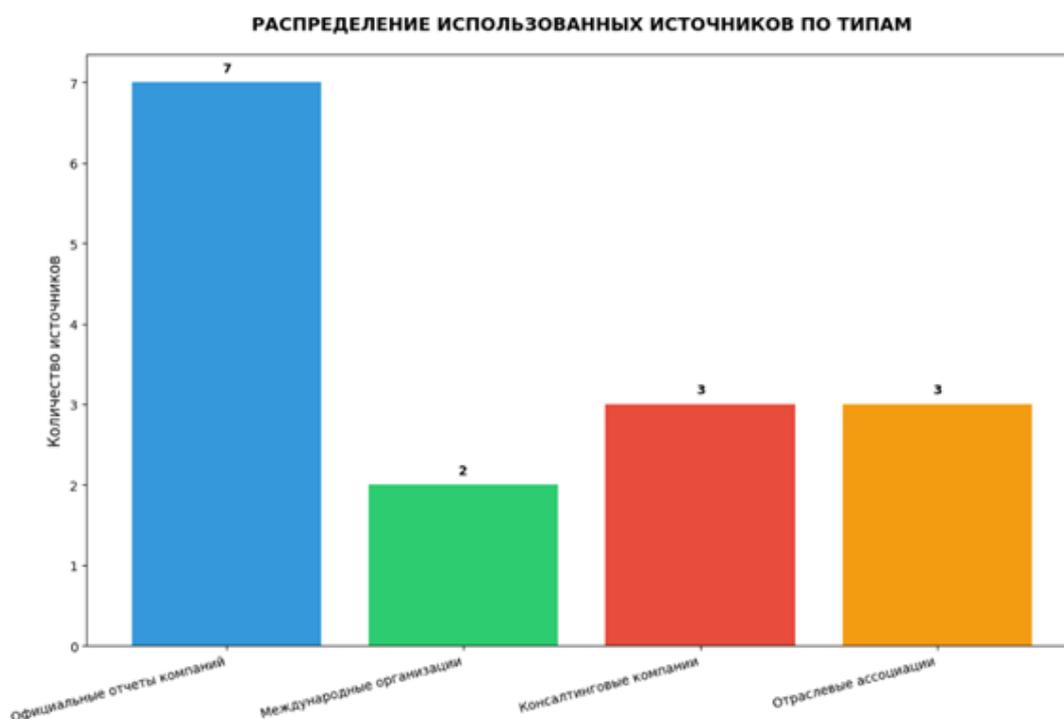


Рисунок 2 – Статистика использованных источников для анализа данных о степени освоенности цифровых технологий в мире

Анализ статистики рисунков 3-5 показывает, что промышленность стоит на пороге цифровой революции: глобальный анализ выявляет как впечатляющие достижения, так и системные вызовы. Лидером роботизации остается Южная Корея с плотностью 1000 роботов на 10 000 сотрудников, однако настоящим феноменом стал Китай, демонстрирующий 46-процентный рост за четыре года и обогнавший США по уровню автоматизации. При этом картина цифровой зрелости показывает тревожный разрыв: лишь 10% компаний являются "цифровыми чемпионами", тогда как 35% остаются в категории отстающих. Технологический ландшафт характеризуется доминированием облачных решений (60% внедрения), в то время как перспективные технологии вроде искусственного ин-

теллекта (20%) и цифровых двойников (15%) остаются нишевыми. Главным барьером трансформации выступают не технические, а человеческие факторы – 45% компаний отмечают сопротивление изменениям и нехватку компетенций.

Особую озабоченность вызывает растущий разрыв между физической автоматизацией (65% зрелости) и цифровой интеграцией (35%), что указывает на недостаточное использование данных для принятия решений. В 2024 году приоритетами становятся AI-центричность, зеленая трансформация и устойчивость цепочек поставок, однако для реализации этого потенциала промышленности предстоит преодолеть фундаментальный разрыв между технологическими возможностями и организационной готовностью.

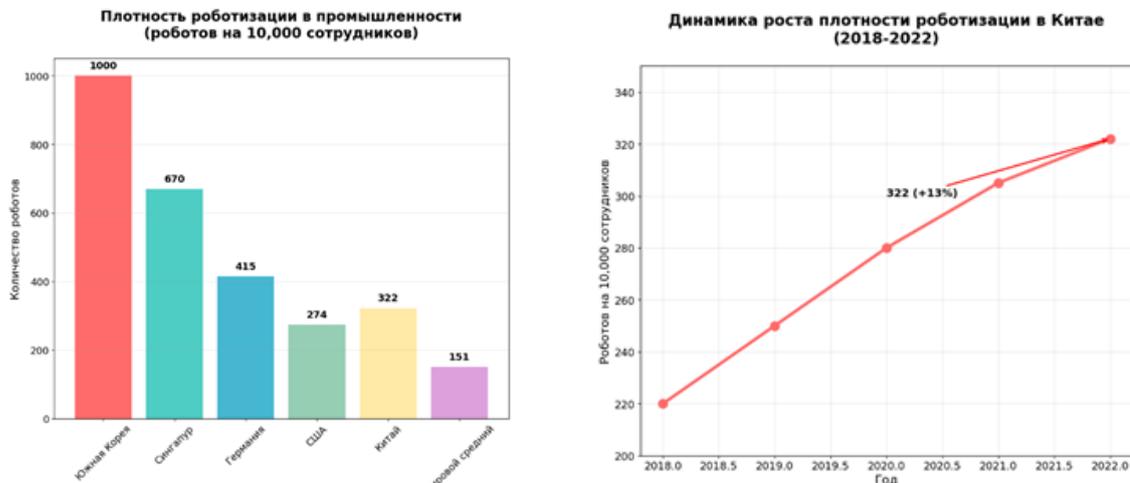
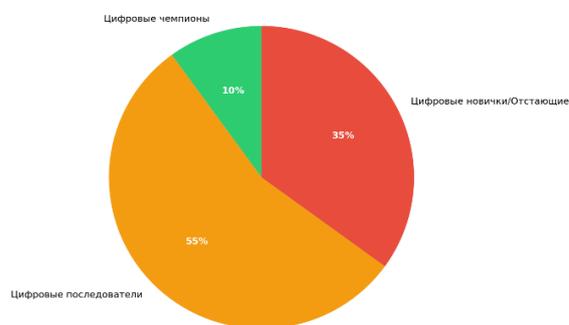


Рисунок 3 – Объективный показатель автоматизации в мире

Распределение промышленных компаний по уровню цифровой зрелости



Уровень внедрения ключевых технологий в промышленности (%)

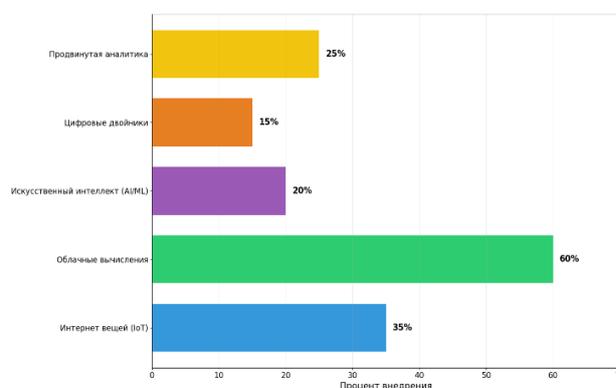


Рисунок 4 – Распределение промышленных компаний по уровню цифровой зрелости и уровень внедрения ключевых технологий в промышленности

ОСНОВНЫЕ БАРЬЕРЫ НА ПУТИ К МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА (% компаний, отмечающих проблему)

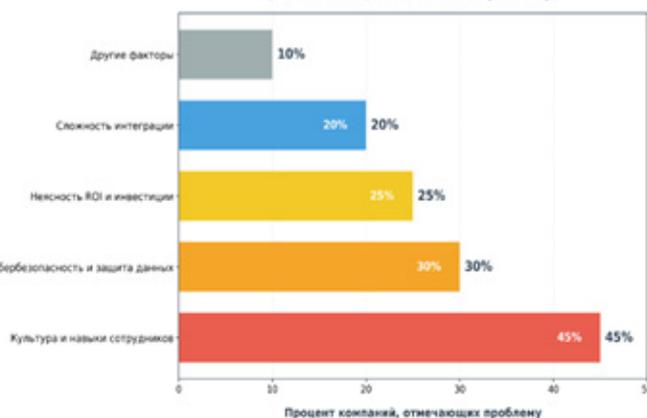


Рисунок 5 – Основные барьеры на пути к модернизации производства

Анализ графиков и диаграмм на рисунках 5-7 показывает значительный потенциал для роста цифровизации в промышленности, который в настоящее время остается недоиспользованным. Если уровень роботизации достиг 65% от потенциально возможного, то интеграция данных реализована лишь на 35%, что указывает на серьезные структурные проблемы в построении единого ин-

формационного пространства предприятий. Распределение инвестиционных потоков подтверждает этот дисбаланс – 35% средств направляется в промышленных роботов, тогда как на критически важные компоненты цифровой трансформации, такие как аналитика и ИИ (15%), интеграция систем (12%) и обучение персонала (10%), выделяются существенно меньшие объемы финансирования.

Особую озабоченность вызывает минимальная доля инвестиций в кибербезопасность (8%), что создает значительные риски для цифровой инфраструктуры. Положительной тенденцией является устойчивый рост глобальных инвестиций в промышленную автоматизацию – с 146 млрд долларов в 2018 году до прогнозируемых 315 млрд к 2025 году, что свидетельствует о призна-

нии стратегической важности цифровой трансформации.

Однако для достижения максимального эффекта необходима перебалансировка инвестиционных приоритетов в сторону интеграционных решений и развития человеческого капитала, которые являются ключевыми факторами успешной цифровизации.



Рисунок 6 – Сравнение уровня автоматизации и цифровизации в промышленности



Рисунок 7 – Ключевые направления цифровизации промышленности

Кроме того, проведенный анализ (рис. 8, 9) демонстрирует устойчивую положительную динамику экономической эффективности инвестиций в промышленную автоматизацию. Как показывают данные, существует прямая корреляция между масштабом предприятия и достигаемым уровнем ROI: крупные корпорации демонстрируют показатель в 52%, тогда как малые предприятия ограничиваются 35%. Такой разрыв объясняется эффектом масштаба и более оптимальным распределением фиксированных затрат на автоматизацию. Критически важным является тот факт, что средний период окупаемости инвестиций составляет от

1,8 до 2,8 лет, что делает проекты автоматизации привлекательными с точки зрения инвестиционного анализа. Динамика возврата на инвестиции имеет выраженный кумулятивный характер – максимальный экономический эффект достигается к 3-5 году реализации проекта, когда совокупный ROI превышает 100%. Структурный анализ компонентов ROI выявляет, что основой экономии выступает сокращение трудозатрат (40-50% общего эффекта) и рост производительности (25-30%), тогда как улучшение качества продукции и снижение простоев оборудования формируют оставшуюся часть экономического эффекта.

Полученные результаты подтверждают стратегическую целесообразность масштабных инвестиций в цифровую трансформацию промышленности, при этом оптимальные результаты

достигаются при комплексном подходе, сочетающем технологические инновации с перестройкой операционных процессов и развитием компетенций персонала [30-39].

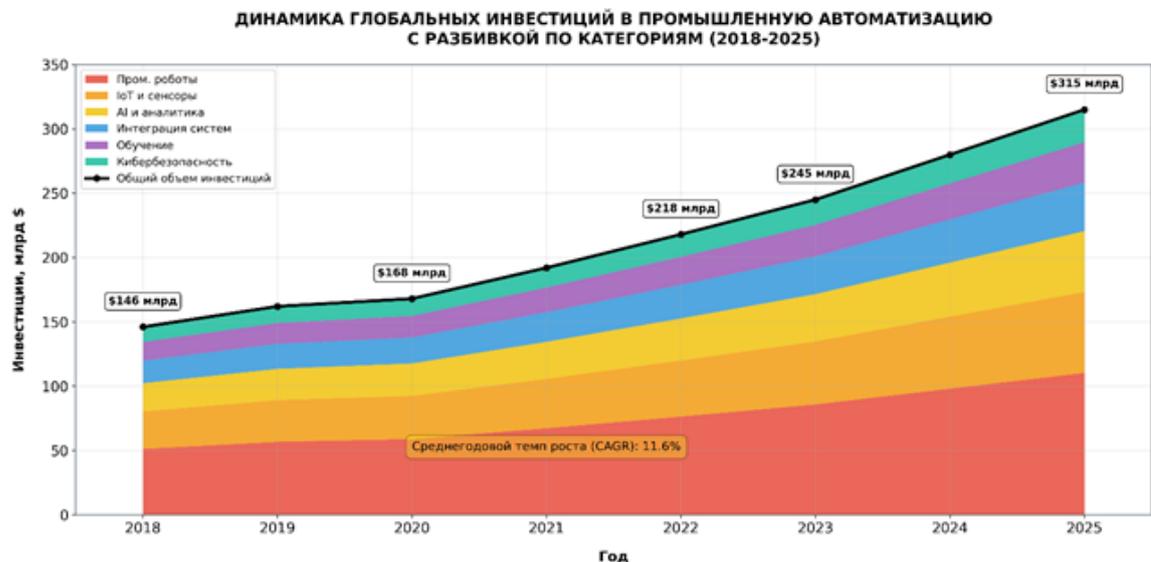


Рисунок 8 – Динамика глобальных инвестиций в промышленную автоматизацию [30-39]

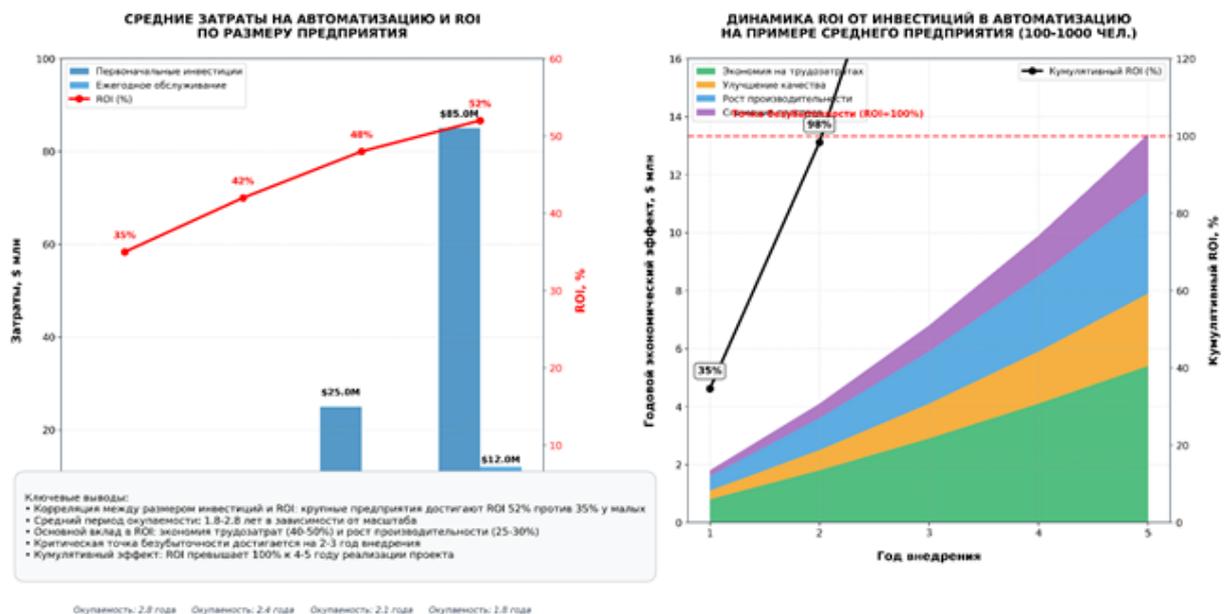


Рисунок 9 – Экономика и тренды процессов цифровизации и автоматизации [30-39]

Результаты. На основании приведенных данных построена функциональная модель предприятия 3.0 на основе методологии *IDEF0*, которая описывает систему как набор взаимосвязанных функций. Для предприятия 3.0 характерна "вертикальная" и "разорванная" архитектура (рис. 10) [16-21], в модели *as-is* преобладают разрывы информационных потоков, реактивное управление, низкая гибкость и высокая зависимость от человеческого фактора на операционном уровне.

Целевая же модель производства Индустрии

5.0 (рис. 11) описывает предприятие как единую, гибкую, адаптивную и человеко-центричную экосистему, процессы интегрированы, данные являются ключевым активом, решения принимаются на основе аналитики, человек выполняет контролирующие и креативные функции.

Для обоснованного выбора стратегии развития была разработана карта технологического аудита производства (табл. 2).

На основании изложенного разработаем стратегию и дорожную карту цифровой трансформации для предприятия (рис. 12).

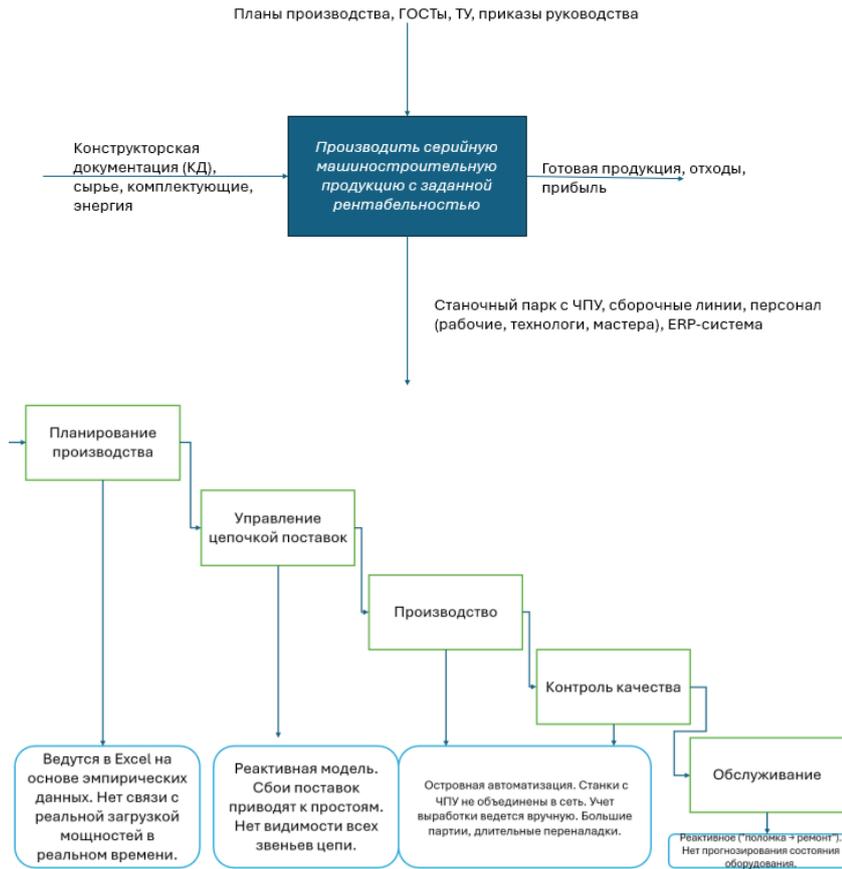


Рисунок 10 – Контекстная диаграмма предприятия 3.0 и ее декомпозиция

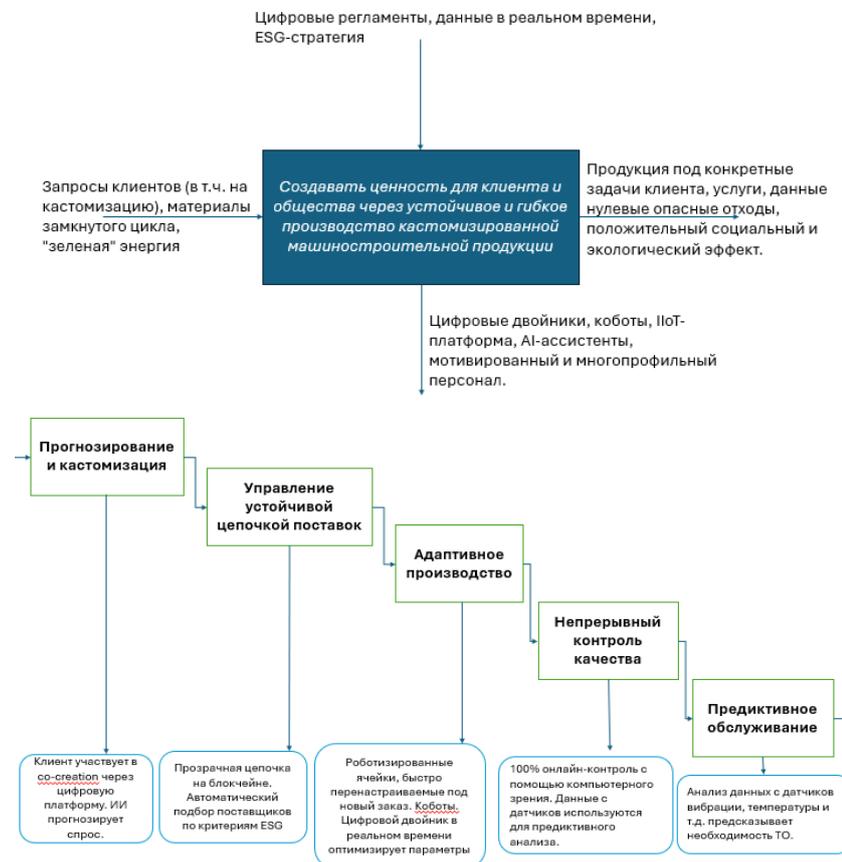


Рисунок 11 – Контекстная диаграмма предприятия 5.0 и ее декомпозиция

Таблица 2 – Карта технологического аудита для производства

Сфера аудита	Методы и инструменты	Цель
Технологический уровень	Анкета зрелости Индустрии 4.0/5.0 (например, от IMPULS или ACATECH), обследование парка оборудования, анализ уровня цифровизации (SCADA, MES, ERP).	Оценить готовность инфраструктуры к модернизации.
Управление процессами	Моделирование бизнес-процессов (BPMN 2.0), картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping).	Выявить узкие места, потери, разрывы в информации и материалах.
Человеческий капитал	Опросы сотрудников, оценка компетенций, анализ вовлеченности, интервью с ключевыми специалистами.	Оценить готовность коллектива к изменениям, выявить дефицит навыков.
Данные и IT	Аудит ИТ-инфраструктуры, оценка качества данных (Data Quality Assessment), анализ кибербезопасности.	Определить возможность интеграции систем и сбора достоверных данных.
Экология и устойчивость	Энергоаудит, анализ материальных потоков (Material Flow Analysis), расчет углеродного следа.	Определить точки роста для повышения энергоэффективности и перехода к циклической экономике.



Рисунок 12 – Обобщенная дорожная карта цифровой трансформации предприятия

Обсуждение. Рассмотрим успешные примеры цифровой трансформации [22-29].

Компания *Siemens*, один из мировых лидеров в области электротехники и автоматизации, радикально изменила процесс проектирования и производства сложной продукции (например, газовых турбин, поездов) с помощью технологии «цифровых двойников (*Digital Twin*)». Это виртуальная копия физического продукта или процесса, которая позволяет моделировать, тестировать и оптимизировать всё ещё на этапе проектирования. Это сократило время вывода продукта на рынок, снизило количество дорогостоящих физических прототипов и уменьшило количество дефектов (рис. 13).

Tesla построила не просто завод, а высокоавтоматизированную «гигафабрику (*Gigafactory*)», где ключевую роль играют роботы (роботы *KUKA*), интегрированные в единую *IoT*-сеть. Процесс от

штамповки деталей до окончательной сборки максимально роботизирован. Данные с каждого этапа собираются и анализируются в реальном времени для контроля качества и оптимизации процессов. Это позволило компании нарастить объем производства до сотен тысяч автомобилей в год (рис. 14).

Самолетостроительная компания *Airbus* столкнулась с проблемой координации действий тысяч поставщиков, снабжающих ее миллионами компонентов. Внедрение единой цифровой платформы *Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE* позволило создать сквозной цифровой процесс от проектирования до технического обслуживания. Инженеры из разных стран работают синхронно в едином виртуальном пространстве, автоматизация процессов проектирования и управления данными значительно повысила эффективность производства (рис. 15).

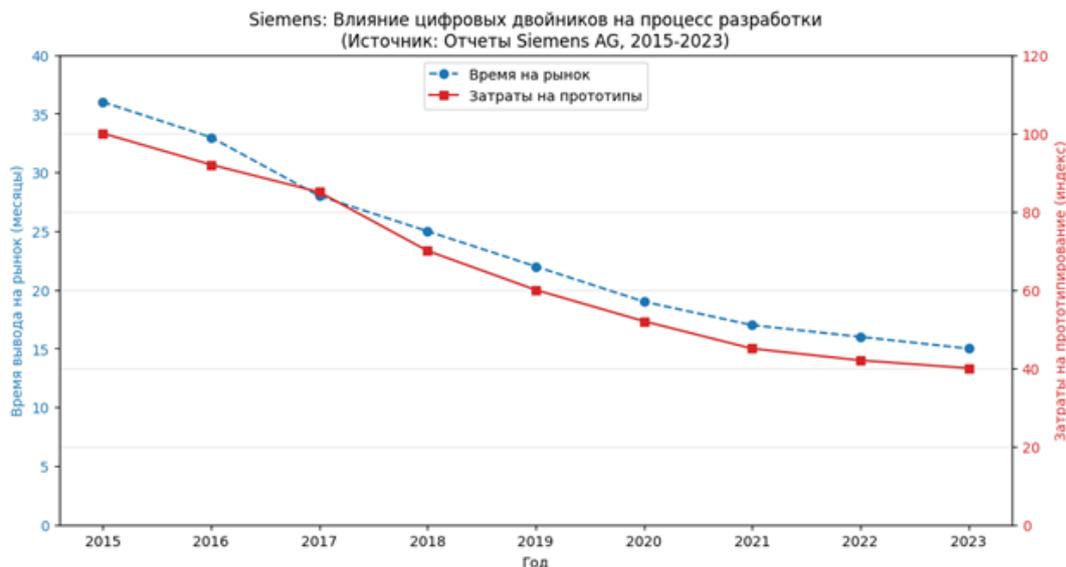


Рисунок 13 – Влияние цифровых двойников на процесс технической подготовки производства на примере Siemens

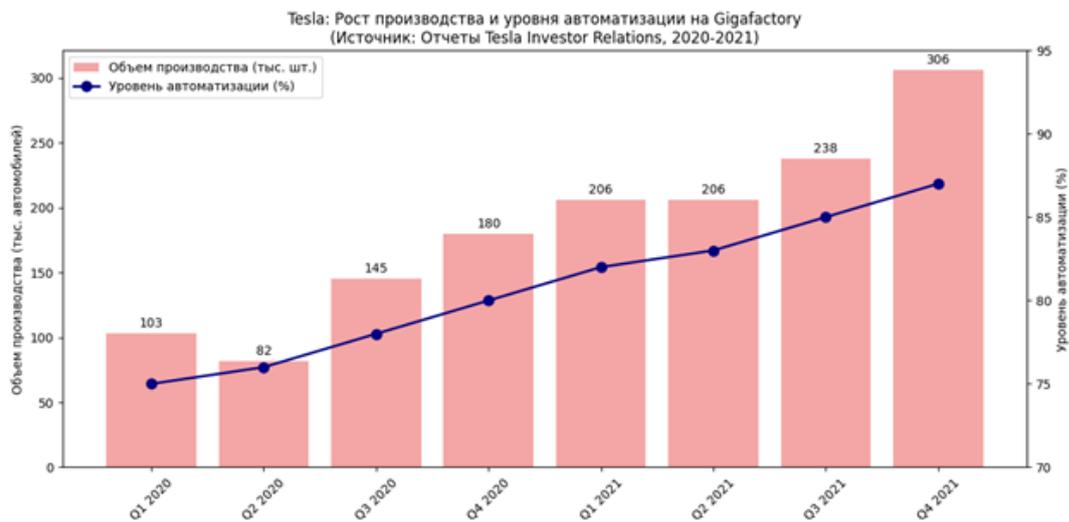


Рисунок 14 – Рост уровня производства и уровня автоматизации на примере Gigafactory

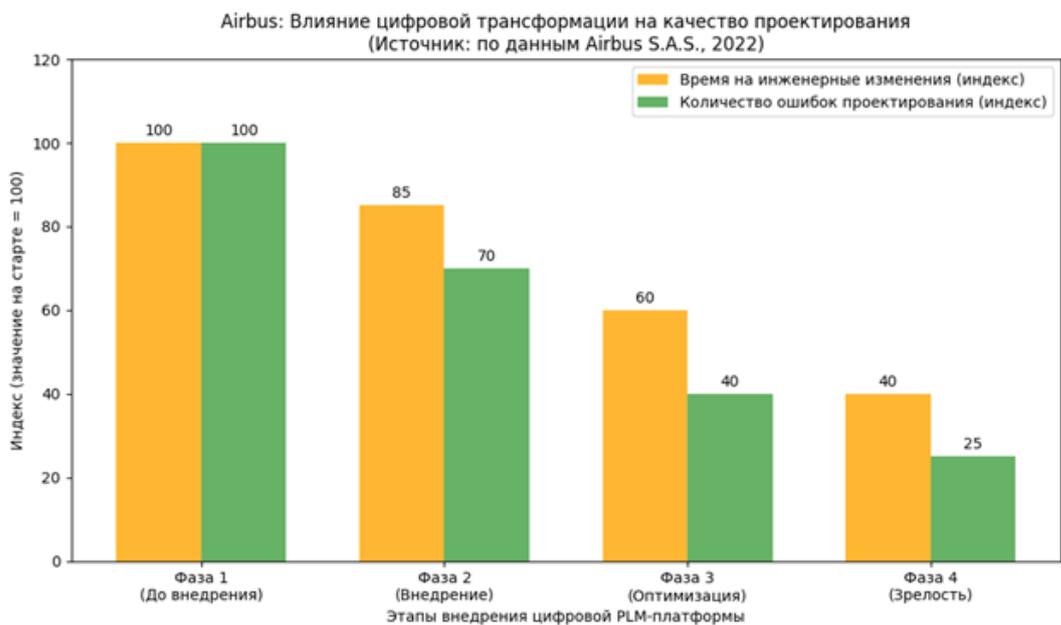


Рисунок 15 – Статистика ошибок проектирования и времени на внесение изменений на примере Airbus

Выводы. Переход от Индустрии 3.0 к 5.0 для российского машиностроительного предприятия – это сложный, но необходимый стратегический путь. Он требует не только капиталовложений в технологии, но, в первую очередь, изменения мышления руководства и инвестиций в работников. Предложенная в работе дорожная карта, основанная на четком аудите и поэтапном внедрении, позволяет минимизировать риски и планомерно двигаться к созданию современного, устойчивого и конкурентоспособного производства, отвечающего вызовам XXI века.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Констатация отставания и структурных проблем: отечественное машиностроение характеризуется значительной неоднородностью и в среднем находится на уровне Индустрии 3.0. Ключевой проблемой является фундаментальный разрыв между уровнем физической автоматизации (65% зрелости) и уровнем цифровой интеграции данных (35% зрелости), что свидетельствует о наличии глубоких структурных проблем в построении единого информационного пространства на предприятиях.

2. Идентификация ключевых барьеров: главными препятствиями на пути модернизации являются не технологические, а человеческие и организационные факторы: сопротивление изменениям, дефицит цифровых компетенций и несбалансированность инвестиционных потоков в пользу "железа" в ущерб интеграционным решениям и развитию человеческого капитала.

3. Экономическая обоснованность трансформации: проекты автоматизации и цифровизации демонстрируют устойчивую положительную экономическую эффективность. Средний срок окупаемости составляет 1.8-2.8 года, а кумулятивный *ROI* превышает 100% к 3-5 году, что подтверждает их инвестиционную привлекательность.

4. Необходимость стратегического перехода: переход к Индустрии 5.0 является не просто технологическим апгрейдом, а стратегическим сдвигом парадигмы – от техноцентричной модели, ориентированной на эффективность, к человекоцентричной экосистеме, создающей ценность для общества и устойчивой к внешним потрясениям.

Научная новизна представленной работы характеризуется следующими пунктами:

1. Разработаны новые функциональные модели. Впервые на основе методологии *IDEFO* построены и противопоставлены функциональная модель предприятия уровня 3.0 (*as-is*), демонстрирующая "разорванную" архитектуру и реактивное управление, и целевая человеко-центричная модель предприятия Индустрии 5.0 (*to-be*), описывающая предприятие как единую, гибкую и адаптивную экосистему.

2. Предложена комплексная методика техно-

логического аудита. Разработана оригинальная карта технологического аудита, которая интегрирует оценку не только технологического уровня и процессов, но и человеческого капитала, данных, ИТ-инфраструктуры, а также экологических аспектов, что обеспечивает всестороннюю диагностику готовности предприятия к трансформации.

3. Создана поэтапная дорожная карта трансформации. Разработана обобщенная, но детализированная дорожная карта перехода от Индустрии 3.0 к 5.0, которая предусматривает эволюционный путь через этапы "Цифровая готовность" (4.0) и "Интеллектуальная интеграция" к целевой стадии "Устойчивая экосистема" (5.0).

4. Проведено комплексное аналитическое исследование. Проведена систематизация и анализ актуальных глобальных данных, выявившая дисбаланс в инвестиционных приоритетах и подтвердившая корреляцию между масштабом предприятия и достигаемым экономическим эффектом от автоматизации.

В работе представлены:

1. Результаты анализа: выявлены текущие глобальные тренды, барьеры и экономические закономерности цифровизации, что служит надежной фактологической базой для формирования стратегии.

2. Результаты моделирования: построены функциональные модели *as-is* и *to-be*, демонстрирующие архитектурные различия между устаревшей и целевой парадигмой производства.

3. Методический результат: разработан и представлен инструментарий для проведения технологического аудита (табл. 2), позволяющий предприятиям самостоятельно оценить свой текущий уровень зрелости.

4. Практический результат: предложена конкретная дорожная карта (рис. 12) с поэтапными действиями, которая может быть адаптирована и использована отечественными машиностроительными предприятиями в качестве руководства для цифровой трансформации.

5. Валидация подхода: на примерах компаний *Siemens*, *Tesla* и *Airbus* продемонстрирована эффективность ключевых элементов предлагаемой трансформации (цифровые двойники, сквозная автоматизация, *PLM*-системы), подтверждающая практическую применимость и потенциал предлагаемых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. United Nations. Digital Economy Report 2023: Towards a Sustainable Digital Economy [Electronic resource]. – URL: <https://www.untsurvey.org/files/documents/report-digital-sustainable-2023-global.pdf> (date accessed: 12.01.2024).

2. World Manufacturing Foundation. World Manufacturing Report 2024: The Digital Transformation of Manufacturing [Electronic resource]. – URL: https://worldmanufacturing.org/wp-content/uploads/14/6-WM-REPORT_2024_LD_E-Book_b_Final.pdf (date accessed: 15.01.2024).

3. PwC Germany. Digital Factory Transformation Survey 2022 [Electronic resource]. – URL: <https://www.pwc.de>

- en/strategy-organisation-processes-systems/operations/digital-factory-transformation-survey-2022.html (date accessed: 18.01.2024).
4. International Federation of Robotics. World Robotics: Industrial Robots 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://ifr.org/wr-industrial-robots/> (date accessed: 20.01.2024).
 5. Gartner Inc. Data & Analytics: Key Trends and Statistics [Electronic resource]. – URL: <https://www.gartner.com/en/data-analytics> (date accessed: 22.01.2024).
 6. Siemens AG. Annual Report 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://www.siemens.com/global/en/company/investor-relations/financial-publications.html> (date accessed: 25.01.2024).
 7. Tesla Inc. Impact Report 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://www.tesla.com/impact-report/2023> (date accessed: 28.01.2024).
 8. Johnson & Johnson. Digital Innovation in Healthcare [Electronic resource]. – URL: <https://www.jnj.com/innovation/digital-innovation> (date accessed: 30.01.2024).
 9. Bosch Group. Industry 4.0: Smart Manufacturing Solutions [Electronic resource]. – URL: <https://www.bosch.com/stories/industry-4-0/> (date accessed: 02.02.2024).
 10. Foxconn Technology Group. Sustainability and Innovation Report 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://www.foxconn.com/en/global/news/sustainability> (date accessed: 05.02.2024).
 11. Airbus S.E. Digitalisation in Aerospace Manufacturing [Electronic resource]. – URL: <https://www.airbus.com/en/innovation/digitalisation> (date accessed: 08.02.2024).
 12. Schneider Electric. Sustainability Report 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://www.se.com/ww/en/about-us/sustainability/> (date accessed: 10.02.2024).
 13. McKinsey & Company. Global Industrial Automation Market Analysis 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/advanced-electronics/our-insights/the-future-of-industrial-automation> (date accessed: 12.02.2024).
 14. Deloitte. 2023 Manufacturing Industry Outlook [Electronic resource]. – URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/manufacturing-industry-outlook.html> (date accessed: 15.02.2024).
 15. Boston Consulting Group. ROI of Industrial Automation 2023 [Electronic resource]. – URL: <https://www.bcg.com/publications/2023/calculating-roi-industrial-automation> (date accessed: 18.02.2024).
 16. Шваб, К. Технологии Четвертой промышленной революции / К.Шваб; пер. с англ. С.Э. Борич. – Москва: Эксмо, 2018. – 320 с. – ISBN 978-5-699-97699-7.
 17. Промышленность 5.0: от концепции к внедрению: коллективная монография / под ред. А.В. Бабкина. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПИРЕСС, 2021. – 245 с.: ил. – ISBN 978-5-7422-6543-2.
 18. Зайцев, А.А. Цифровые двойники в машиностроении: теория и практика / А.А. Зайцев, И.В. Смирнов // Автоматизация и современные технологии. – 2020. – № 5. – С. 12-18.
 19. Роботизация и искусственный интеллект в промышленности: глобальные тренды и российская практика: аналитический отчет / НИУ ВШЭ; [отв. ред. Л. М. Гохберг]. – Москва: НИУ ВШЭ, 2022. – 156 с. – ISBN 978-5-7598-2341-5.
 20. Тарасов, И.В. Управление цепочками поставок в условиях Индустрии 4.0 / И. В. Тарасов // Логистика и управление цепочками поставок. – 2019. – № 4 (93). – С. 24-33.
 21. European Commission. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry / Directorate-General for Research and Innovation. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. – 40 p. – DOI: 10.2777/308407.
 22. Siemens Digital Industries Software. Цифровые двойники: от концепции до внедрения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/our-story/glossary/digital-twin/24465> (дата обращения: 15.12.2024).
 23. KUKA AG. Робототехнические решения для автомобильной промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.kuka.com/ru-ru/otrasli/avtomobilstroitel_naya_promyshlennost (дата обращения: 15.12.2024).
 24. Tesla, Inc. Gigafactory: производство следующего поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tesla.com/gigafactory> (дата обращения: 15.12.2024).
 25. Airbus Group. Цифровая трансформация в авиастроении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.airbus.com/en/innovation/digital-design-and-manufacturing> (дата обращения: 15.12.2024).
 26. Dassault Systèmes. Платформа 3DEXPERIENCE для аэрокосмической отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3ds.com/ru/products-services/3dexperience/industries/aerospace-defense> (дата обращения: 15.12.2024).
 27. McKinsey & Company. Цифровые двойники в промышленности: анализ эффективности внедрения. – 2023. – № 4. – С. 45-52.
 28. International Federation of Robotics. World Robotics Report 2024: Промышленные роботы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ifr.org/worldrobotics> (дата обращения: 15.12.2024).
 29. Harvard Business Review. Цифровая трансформация производственных предприятий: кейсы и лучшие практики. – 2023. – Т. 12. – № 3. – С. 78-89.
 30. Deloitte Global Automation Survey 2024: анализ затрат на автоматизацию промышленных предприятий [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/manufacturing/articles/global-automation-survey.html> (дата обращения: 15.12.2024).
 31. McKinsey & Company. Industry 4.0 ROI Benchmark 2023: оценка экономической эффективности цифровой трансформации // Digital Manufacturing Review. – 2023. – № 3. – С. 45-62.
 32. PricewaterhouseCoopers. Digital Factory Transformation Report 2024: исследование инвестиций в промышленную автоматизацию [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/digital-factory-transformation.html> (дата обращения: 15.12.2024).
 33. Boston Consulting Group. Industry 4.0 Economic Impact Study: динамика возврата на инвестиции в автоматизацию // BCG Manufacturing Analytics. – 2024. – Т. 12. – № 2. – С. 78-95.
 34. Massachusetts Institute of Technology. Automation ROI Analysis: лонгитюдное исследование 2019-2024 гг. [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://mit.edu/automation-roi-study> (дата обращения: 15.12.2024).
 35. Harvard Business Review. Manufacturing ROI Metrics: методология расчета экономической эффективности автоматизации // Harvard Business Review Russia. – 2023. – № 5. – С. 112-125.
 36. International Federation of Robotics. World Robotics Report 2024: статистика внедрения промышленных роботов [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://ifr.org/worldrobotics/> (дата обращения: 15.12.2024).
 37. Siemens AG. Digital Enterprise Suite: экономика цифровых двойников в промышленности. – Munich: Siemens AG, 2023. – 156 с.
 38. Rockwell Automation. State of Smart Manufacturing Report 2024: глобальный обзор автоматизации производства [Электронный ресурс]. – 2024. – Режим доступа: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/rockwell-automation-releases.html> (дата обращения: 15.12.2024).
 39. ABB Group. Industrial Automation Investment Analysis 2023: рентабельность инвестиций в роботизацию // ABB Technical Review. – 2023. – № 4. – С. 23-41.

Статья поступила в редакцию 03.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 004.4'2
EDN: CICQCN

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ КОНВЕЙЕРА *DEVSECOPS* ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ *CI/CD*

© Автор(ы) 2025
SPIN: 3048-3299
AuthorID: 473970
ORCID: 0000-0001-7466-1256

ЧИГИРЕВА Ирина Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: ichigireva@yandex.ru)

SPIN: 5624-6036
AuthorID: 667949
ORCID: 0000-0002-0816-0944

ЕГОРОВА Екатерина Сергеевна, кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Прикладная информатика»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: katepost@yandex.ru)

ФЕДОТОВ Никита Дмитриевич, *DevOps*-инженер
АО «Неофлекс»

(440000, Пенза, ул. Революционная, д. 71, nikita-dock@list.ru)

Аннотация. В статье предлагается вариант практической реализации автоматизированного конвейера *DevSecOps*, который объединяет непрерывную интеграцию, тестирование, анализ безопасности и развертывание приложений. Ядром решения является автоматизация процессов *CI/CD* с использованием набора встроенных инструментов для статического и динамического анализа кода, сканирования зависимостей, проверки безопасности образа контейнера и централизованного управления уязвимостями. Предлагаемая конфигурация конвейера сочетает в себе автоматизацию разработки и доставки программного обеспечения с контролем безопасности, позволяя тем самым снижать риск кибератак и ускорять вывод программного продукта на рынок. Разработанный конвейер легко адаптируется к различным языкам программирования и инфраструктурным решениям, что делает его универсальным инструментом для современных ИТ-команд. Техническая реализация использует инструменты с открытым исходным кодом и предназначена для работы на отечественном дистрибутиве *Linux Red OS*, что соответствует требованиям импортозамещения в России. Конфигурация сервера включает надежное аппаратное обеспечение для поддержки автоматизированных процессов, обеспечивающее стабильность и эффективность. Это исследование вносит свой вклад в развитие отрасли, предлагая практичное, адаптируемое и экономичное решение для современных задач разработки программного обеспечения. Оно особенно актуально для организаций, переходящих на облачные архитектуры и микросервисы, где традиционные меры безопасности оказываются неэффективными.

Ключевые слова: *DevOps*, *DevSecOps*, непрерывная интеграция (*CI*), непрерывная доставка (*CD*), конвейер *CI/CD*, автоматизация безопасности, статический анализ безопасности (*SAST*), динамический анализ безопасности (*DAST*), сканирование уязвимостей, импортозамещение, контейнеризация.

PRACTICAL ASPECTS OF CREATING A *DEVSECOPS* PIPELINE FOR AUTOMATING *CI/CD* PROCESSES

© The Author(s) 2025

CHIGIREVA Irina Valerievna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Applied Informatics
Penza State Technological University

(440039, Penza, Baydukova passage/ul. Gagarina, 1a/11, e-mail: ichigireva@yandex.ru)

EGOROVA Ekaterina Sergeevna, candidate of economic sciences, associate professor,
head of the Department of Applied Informatics
Penza State Technological University

(440039, Penza, Baydukova passage/ul. Gagarina, 1a/11, e-mail: katepost@yandex.ru)

FEDOTOV Nikita Dmitrievich, *DevOps* engineer
JSC Neoflex

(440000, Penza, Revolutsionnaya str., 71, nikita-dock@list.ru)

Abstract. The article suggests a practical implementation of the automated *DevSecOps* pipeline, which combines continuous integration, testing, security analysis, and application deployment. The core of the solution is the automation of *CI/CD* processes using a set of built-in tools for static and dynamic code analysis, dependency scanning, container image security verification, and centralized vulnerability management. The proposed pipeline configuration combines

automation of software development and delivery with security controls, thereby reducing the risk of cyber attacks and speeding up the software product's market launch. The developed pipeline is easily adaptable to various programming languages and infrastructure solutions, which makes it a universal tool for modern IT teams. The technical implementation uses open source tools and is designed to run on the domestic *Linux Red OS* distribution, which meets the requirements of import substitution in Russia. The server configuration includes reliable hardware to support automated processes, ensuring stability and efficiency. This research contributes to the development of the industry by offering a practical, adaptable and cost-effective solution to modern software development challenges. It is especially relevant for organizations moving to cloud architectures and microservices, where traditional security measures are proving ineffective.

Keywords: *DevOps, DevSecOps, continuous integration (CI), continuous delivery (CD), CI/CD pipeline, security automation, static security analysis (SAST), dynamic security analysis (DAST), vulnerability scanning, import substitution, containerization.*

Для цитирования: Чигирева И.В. Практические аспекты создания конвейера DevSecOps для автоматизации процессов CI/CD / И.В. Чигирева, Е.С. Егорова, Н.Д. Федотов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 21-30. – EDN: CICQCN.

Введение. В современных условиях цифровизации различных сфер деятельности и одновременного роста числа киберугроз обеспечение безопасности на всех этапах разработки программного обеспечения становится критически важной задачей. Даже единичные уязвимости в программном коде или ошибки конфигураций могут привести к масштабным последствиям в сфере информационной безопасности, финансовым потерям и репутационным рискам для организаций. Однако в большинстве организаций, не смотря на активное внедрение *DevOps*-практик (набор методологий по разработке и поддержке программного обеспечения, *DEvelopment OPerations*), процесс разработки и развертывания программного обеспечения все еще включает множество ручных этапов, что не только замедляет выпуск обновлений, но и создает значительные риски с точки зрения безопасности.

На рисунке 1 показан традиционный процесс разработки и развертывания программного обеспечения, при котором все ключевые действия выполняются вручную: тестирование, сборка, сканирование кода и зависимостей, проверка контейнерных образов и анализ уязвимостей.

Такой подход может приводить к ряду серьезных

проблем, рассмотрим основные из них.

Ручное выполнение тестов, сборки, сканирования, развертывания и запуска веб-приложения в его рабочей среде (*deploy*) приводит к пропуску уязвимостей, поскольку при работе с большим количеством изменений вероятность человеческих ошибок высока.

Проверка безопасности часто выполняется после завершения разработки. Такое запоздалое обнаружение уязвимостей усложняет исправление найденных проблем и увеличивает издержки.

Многочисленные ручные этапы замедляют процесс развертывания. В свою очередь низкая скорость выпуска обновлений снижает конкурентоспособность и мешает оперативному реагированию на новые угрозы.

По мере роста количества сервисов и инфраструктуры ручное тестирование и проверка безопасности становятся неэффективными и требующими значительных ресурсов, что приводит к трудностям с масштабированием приложений.

Без автоматизации разные команды могут использовать различные методы проверки. Таким образом, отсутствие единого подхода к безопасности приводит к несогласованности процессов и снижает уровень защиты.

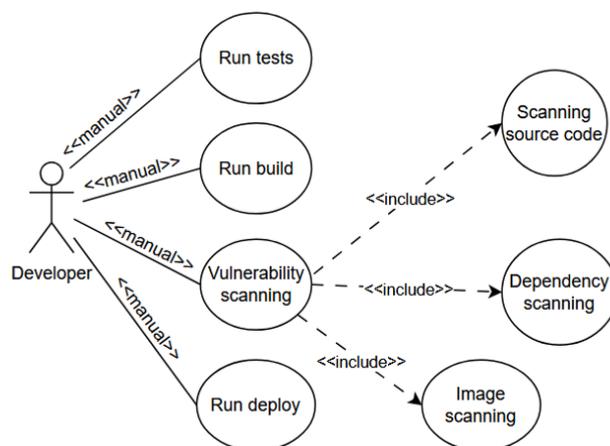


Рисунок 1 – Традиционный процесс разработки и развертывания

В последние годы в научных публикациях вопросам анализа методологий и инструментов непрерывной интеграции и непрерывной доставки программного обеспечения с целью повышения эффективности и автоматизации процессов уделяется повышенное внимание. Когда предприятия внедряют облачные технологии, обычно требующие динамических сред и архитектуры микросервисов, традиционных решений безопасности становится недостаточно [1]. В исследованиях [5, 9] подчеркивается важность интеграции методов обеспечения безопасности в рамках конвейера *DevOps* и дальнейшего развития парадигмы в методологии *DevSecOps* (непрерывная разработка программного продукта с учетом требований безопасности, *Development, Security & Operations* [10]), целью которой является внедрение безопасности в качестве фундаментального компонента на протяжении всего жизненного цикла разработки программного обеспечения, для повышения уровня безопасности программных продуктов без ущерба для скорости и эффективности процесса создания. Приводятся аргументы в пользу автоматизации процессов безопасности и обеспечения непрерывного обучения и сотрудничества между разработчиками и специалистами по безопасности для повышения эффективности и безопасности разрабатываемых продуктов.

В работе [3] также отмечается, что для компаний-разработчиков, пытающихся включить элементы управления безопасностью прямо в процесс *CI/CD* (*Continuous Integration, Continuous Delivery* – непрерывная интеграция и непрерывная доставка), *DevSecOps*-методология, состоящая из концепций безопасности в фреймворке *CI/CD*, стала, по сути, ключевой. Фактически, эта методология знаменует собой культурную революцию, поддерживающую групповую ответственность и сотрудничество в команде. Прямая интеграция мер безопасности в конвейер *CI/CD* позволяет компаниям использовать автоматизацию для проведения аудитов безопасности в нескольких местах, от фиксации кода до развертывания, тем самым снижая риск раскрытия уязвимостей при использовании. Этот упреждающий подход помогает командам разработчиков контролировать возможные угрозы, тем самым снижая риск за счет регулярных проверок безопасности в ходе разработки. В соответствии с этим применение статического тестирования безопасности приложений (*SAST*) является актуальным методом при оценивании появления уязвимостей по мере написания кода [3].

В работах [2, 4, 7] рассматриваются подходы, ориентированные на обеспечение безопасности в рамках конвейеров *CI/CD* в облачных вычислительных средах, с акцентом на совершенствование методов *DevSecOps*. Отмечается, что по мере того, как все чаще внедряются облачные архитектуры и гибкие методологии разработки,

потребность в надежных автоматизированных мерах безопасности становится первостепенной. При этом, подчеркивается необходимость обеспечения безопасности на ранней стадии, чтобы компании-разработчики могли выявлять и устранять проблемы до того, как они станут серьезной проблемой.

Автор работы [6] особое внимание уделяет исследованию вопросов, связанных с интеграцией *DevSecOps* в современных условиях перехода на отечественное программное обеспечение, поскольку значимым результатом событий 2022 года стала необходимость импортозамещения программного обеспечения, а также неизменность данной тенденции в настоящее время. Материалы, представленные в [6], освещают ключевые проблемы, которые препятствуют российским компаниям повсеместно интегрировать *DevSecOps*, придавая большое значение специфике информационной безопасности в России, а также возможностям использования open-source инструментов для достижения целей *DevSecOps*.

Концепция пайплайнов (*pipelines*) *CI/CD* и *DevSecOps* в кибербезопасности, подробно рассмотренная в работе [8], выполняет ведущую функцию в автоматизации процессов защиты данных и систем, а также в управлении уязвимостями и реагировании на инциденты. Авторами подчеркиваются преимущества такой автоматизации, включая повышение скорости выпуска обновлений, уменьшение человеческого фактора и улучшение масштабируемости защиты, а кроме того, важность внедрения пайплайнов для повышения общей безопасности организаций в условиях постоянно растущих киберугроз.

Целью исследования является разработка методики и практической конфигурации автоматизированного *DevSecOps*-конвейера, интегрирующего инструменты статического и динамического анализа безопасности в процесс *CI/CD*, решающего задачу раннего и автоматизированного выявления уязвимостей в условиях импортозамещения, что позволяет количественно снизить риски безопасности и операционные издержки при непрерывной поставке программного обеспечения.

Методология. Методологической основой исследования выступил подход *DevSecOps*, предполагающий интеграцию практик безопасности («*Security*») в сквозные процессы разработки и эксплуатации. В рамках данной парадигмы безопасность рассматривается не как обособленная фаза, а как неотъемлемый компонент на протяжении всего жизненного цикла ПО. Конкретно в данной работе применялся метод практической реализации конвейера (*pipeline*), который представляет собой формализованную последовательность автоматизированных стадий, обеспечивающих сборку, тестирование, анализ безопасности и развертывание приложения.

Авторами предлагается вариант практической

реализации конфигурации автоматизированного конвейера *DevSecOps*, способствующий обеспечению мониторинга и защиты на всех этапах разработки, использующий технологию с открытым исходным кодом и импортозамещённые решения на базе отечественного дистрибутива *Linux Red OS*. Это означает, что весь исходный код используемого для разработки конвейера программного обеспечения доступен для изучения, модификации и адаптации под конкретные задачи предприятия. В отличие от применения коммерческих продуктов, в этом случае отсутствуют лицензионные ограничения и дополнительные расходы на лицензирование, что позволяет гибко настраивать и улучшать функциональность в соответствии с требованиями проекта и внутренними стандартами организации. Снижение операционных и лицензионных затрат особенно важно в условиях ограниченных бюджетов в государственных или корпоративных структурах. Все инструменты сканирования, интегрированные в конвейер, будут пересобраны и адаптированы для работы на отечественном дистрибутиве *Linux Red OS* [11]. Это не только обеспечивает соответствие требованиям импортозамещения, но и гарантирует автономность системы от внешних поставщиков. Такая адаптация позволяет исключить зависимость от зарубежных технологий, а также обеспечить стабильную работу в условиях потенциальных санкций или ограничений, что является важным стратегическим преимуществом для российских компаний.

Предлагаемый вариант конфигурации *DevSecOps*-конвейера, который автоматизирует и делает проверки безопасности частью всех этапов разработки, включая самые ранние, четко согласуется со встраиванием подхода *DevSecOps* в процессы *CI/CD*. Такой подход, как указывалось выше, позволяет не

только повысить уровень защиты приложений, но и значительно ускорить их разработку и развертывание.

Разработанный конвейер интегрируется с платформой для управления проектами и репозиториями программного кода *GitLab*, автоматически анализирует код, зависимости, контейнерные образы и инфраструктуру, а также централизует управление уязвимостями.

Общая схема процесса, в который встроена работа *DevSecOps*-конвейера, представлена на рисунке 2 и включает следующие этапы с контролем безопасности:

Этап 1. Внесение разработчиком изменений в код: фиксация изменений в коде (*commit*) в репозиторий автоматически запускает процесс сборки и проверки.

Этап 2. Автоматическое сканирование кода и зависимостей: код анализируется на наличие уязвимостей, небезопасных зависимостей и утечек конфиденциальных данных.

Этап 3. Проверка контейнерных образов: перед развертыванием контейнеры проходят автоматическое сканирование на наличие уязвимостей, только проверенные и безопасные образы загружаются в защищенное хранилище.

Этап 4. Централизованное управление уязвимостями: все обнаруженные уязвимости фиксируются в системе управления безопасностью для дальнейшего анализа и устранения.

Этап 5. Автоматизированное развертывание приложения: только проверенные образы проходят процесс развертывания в инфраструктуре, исключая возможность использования уязвимого кода.

Декомпозиция работы *DevSecOps*-конвейера представлена на рисунке 3. Для реализации его функций выбран стек инструментов, которые доступны российским разработчикам.

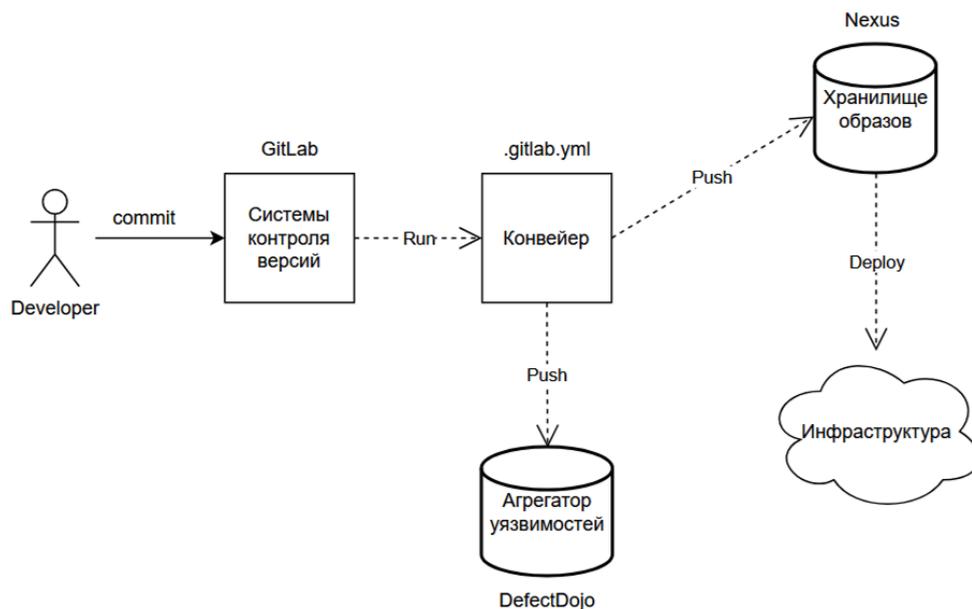


Рисунок 2 – Общая схема работы *DevSecOps*-конвейера

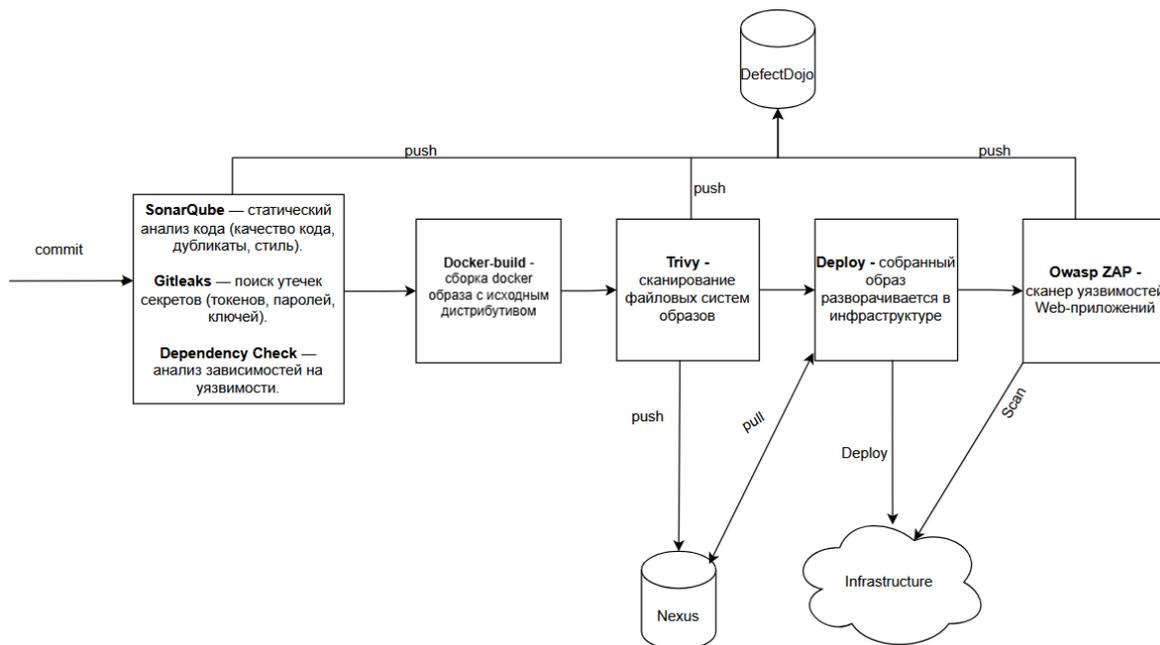


Рисунок 3 – Декомпозиция работы DevSecOps-конвейера

Далее рассмотрим состав и содержание действий на каждом шаге.

Шаг 1. Инициация конвейера. Разработчик вносит изменения в код и отправляет коммит (*commit* – фиксирует изменения в коде) в *GitLab* [12]. Далее запускается конвейер, который последовательно выполняет этапы анализа и сборки. Каждое изменение в коде становится отправной точкой для автоматизированного запуска *DevSecOps*-конвейера, что исключает необходимость в ручном запуске процессов и способствует поддержанию высокого уровня оперативности.

Шаг 2. Автоматический анализ безопасности кода. Статический анализ кода (*SAST*) включает в себя выполнение анализа исходного кода на наличие уязвимостей и небезопасных практик (небезопасные *SQL*-запросы, использование устаревших *API*, дублирующийся код, некорректная обработка исключений) с использованием *SonarQube* (платформа с открытым исходным кодом для непрерывного анализа) [13, 16]. На рисунке 4 представлен фрагмент файла *gitlab-ci.yml*, в котором на-

строена отдельная стадия для запуска анализа.

В процессе выполнения стадии анализа происходит подключение к серверу *SonarQube*, передача метаданных проекта, сканирование классов и формирование отчёта с количеством найденных уязвимостей в коде (рис. 5).

Результат работы статического анализатора, появившийся в веб-интерфейсе *SonarQube*, показывает перечень обнаруженных дефектов, их категории, уровни критичности, а также ссылки на конкретные участки кода, а также пути их устранения на базе общеизвестных паттернов (рис. 6).

Анализ зависимостей (*Dependency Scanning*) предполагает проверку наличия уязвимых библиотек и пакетов в проекте с использованием *Dependency Check* (инструмент с открытым исходным кодом от *OWASP*, предназначенный для анализа зависимостей проекта с целью обнаружения уязвимостей на основе баз данных *CVE*).

На рисунке 7 представлен фрагмент конфигурации пайплайна, в котором описана стадия анализа зависимостей:

```

32
33  sonarqube:
34    image:
35      name: maven:3.8.6-openjdk-11
36      entrypoint: [""]
37    stage: sonarqube
38    script:
39      - mvn verify sonar:sonar -Dsonar.projectKey=vkr
40      - sonar-report --sonarurl="${SONAR_HOST_URL}" --sonartoken="${SONAR_TOKEN}" /
41        --sonarcomponent="vkr" --project="vkr" --application="portals" /
42        --output="sonar-report.html" --sonarusername=${SONAR_LOGIN} --sonarpassword=${SONAR_PASSWORD}
43    artifacts:
44      paths:
45        - sonar-report.html
46
47

```

Рисунок 4 – Исходный код стадии статического анализа кода

```

45 Summary of the Detected Vulnerabilities
46 Severity: BLOCKER
47 Number of Issues: 2
48 Severity: CRITICAL
49 Number of Issues: 3
50 Severity: MAJOR
51 Number of Issues: 18
52 Severity: MINOR
53 Number of Issues: 12
54 using stylesheet file: /usr/local/lib/node_modules/sonar-report/style.css
55 Uploading artifacts for successful job
56 Uploading artifacts...
57 sonar-report.html: found 1 matching artifact files and directories
58 Uploading artifacts as "archive" to coordinator... 201 Created id=440205 responseStatus=201 Created token=64_xpe8N
59 Cleaning up project directory and file based variables
60 Job succeeded
    
```

Рисунок 5 – Отчет о количестве уязвимостей в коде

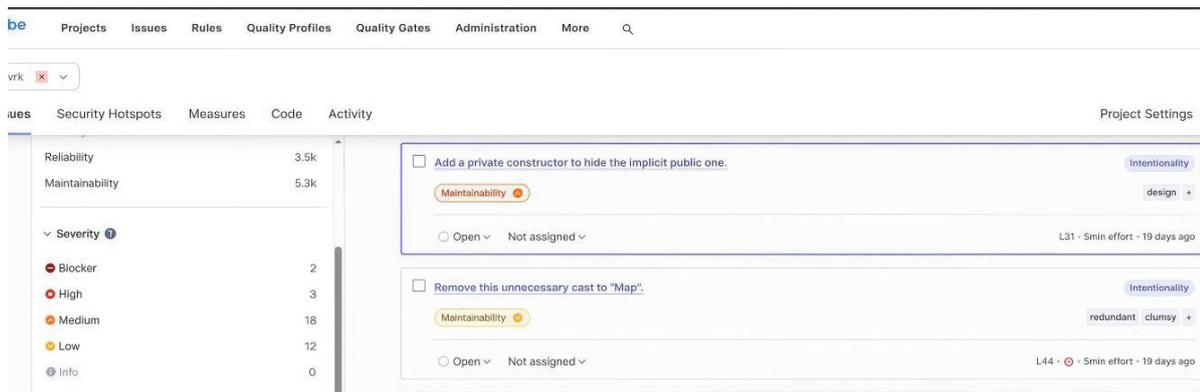


Рисунок 6 – Отчет в интерфейсе SonarQube

```

36
37 dependency-check:
38   stage: dependency-check
39   image:
40     name: owasp/dependency-check:12.1.1
41     entrypoint: [""]
42   script:
43     - /usr/share/dependency-check/bin/dependency-check.sh
44     --scan ./
45     --format XML
46     --out owasp-dep-check-scan.xml
47     - ls
48   artifacts:
49     paths:
50     - owasp-dep-check-scan.xml
51
    
```

Рисунок 7 – Исходный код стадии по анализу зависимостей

В результате выполнения шага при наличии уязвимых модулей и компонентов соответствующая запись отобразилась в отчёте (рис. 8).

Также на этом шаге с использованием *Gitleaks* (SAST-инструмент с открытым исходным кодом, разработанный для обнаружения секретов в репозиториях *Git*) выполняется анализ утечек секретов (*Secret Scanning*) – проверяются коммиты (*commits*) на наличие утечек паролей, токенов и других конфиденциальных данных [14, 15] с проверкой всего репозитория (рис. 9).

Шаг 3. Сборка проекта. Если код прошёл предыдущие проверки, запускается сборка артефактов (*JAR*, *WAR*, двоичные файлы) с исполь-

зованием *Apache Maven*, *Gradle* (системы для автоматизации сборки приложений и сбора статистики об использовании программных библиотек), *Docker* (платформа для контейнеризации приложения со всем окружением и зависимостями) [17-19].

Шаг 4. Сканирование контейнерных образов (Container Scanning). Контейнерный образ приложения проверяется на уязвимости перед развертыванием и запуском (*deploy*) с использованием *Trivy* (инструмент, сканирующий контейнеры на уязвимости, конфигурационные ошибки и наличие вредоносных компонентов). Только в случае успешного сканирования образ считается

допустимым к дальнейшему использованию и загружается в защищённое хранилище – *Nexus*, где хранится до момента развёртывания.

Шаг 5. Автоматизированное развёртывание и запуск веб-приложения в его рабочей среде (deploy). На данном шаге выполняется развёртывание безопасного приложения. Проверенный образ из *Nexus* автоматически развёртывается в инфраструктуре.

Шаг 6. Динамическое тестирование безопасности (DAST). Выполняется тестирование веб-приложений на уязвимости. С использованием инст-

рументария *OWASP ZAP* (открытое программное обеспечение, предоставляющее инструменты для глубокого динамического анализа уязвимостей) запускается автоматическое тестирование на *SQL*-инъекции, межсайтовый скриптинг (*XSS*) и другие распространённые векторные атаки [20]. *OWASP ZAP* был настроен для запуска в *headless*-режиме (без интерфейса) с помощью *Docker*-образа. В конфигурации *gitlab-ci.yml* определена отдельная стадия, которая запускает *ZAP* против целевого *URL* (рис. 10).

```

<vulnerabilities>
  <vulnerability source="NVD">
    <name>CVE-2021-44228</name>
    <knownExploitedVulnerability>
      <vendorProject>Apache</vendorProject>
      <product>Log4j2</product>
      <name>enc.xml(Apache Log4j2 Remote Code Execution Vulnerability)</name>
      <dateAdded>2021-12-10</dateAdded>
      <description>Apache Log4j2 contains a vulnerability where JNDI features do not protect against attacker-cc
      <requiredAction>For all affected software assets for which updates exist, the only acceptable remediation
      https://www.cisa.gov/uscert/ed-22-02-apache-log4j-recommended-mitigation-measures are only acceptable unti
      <dueDate>2021-12-24</dueDate>
      <notes>https://nvd.nist.gov/vuln/detail/CVE-2021-44228</notes>
    </knownExploitedVulnerability>
    <severity>CRITICAL</severity>
  </vulnerability>
</vulnerabilities>

```

Рисунок 8 – Отчёт Dependency Check с выявленной CVE

```

64  gitleaks:
65    stage: gitleaks
66    image:
67      name: ghcr.io/gitleaks/gitleaks:latest
68      entrypoint: [""]
69    script:
70      - gitleaks detect --source="." --report-format json --report-path=gitleaks-report.json || true
71    artifacts:
72      paths:
73        - gitleaks-report.json
74      when: always

```

Рисунок 9 – Исходный код стадии по анализу утечки секретов

```

106  owasp-zap:
107    stage: owasp-zap
108    image:
109      name: ghcr.io/zaproxy/zaproxy:stable
110      entrypoint: [""]
111    script:
112      - mkdir /zap/wrk
113      - zap.sh || true
114      - zap-full-scan.py -t https://localhost.com/ -x report.xml || true
115      - cp /zap/wrk/report.xml report.xml
116

```

Рисунок 10 – Исходный код стадии запуска OWASP ZAP

Шаг 7. Централизованное управление уязвимостями. Осуществляется сбор и анализ результатов. Все найденные уязвимости автоматически загружаются в *DefectDojo* (система отслеживания ошибок и уязвимостей). Такая централизация позволяет отслеживать статус каждой проблемы, назначать ответственных за её устранение и контролировать процесс до полного закрытия всех инцидентов.

Техническое обеспечение. Для развёртывания *DevSecOps*-конвейера требуется сервер, на котором будут выполняться процессы автоматизирован-

ного анализа кода, проверки зависимостей, поиска уязвимостей, а также сборки и хранения артефактов. Данный сервер будет использоваться для работы *CI/CD*-инструментов, таких как *GitLab Runner*, системы статического и динамического анализа кода, а также хранилища контейнерных образов. Для сборки сервера предлагается следующий ориентировочный состав комплектующих: оперативная память 32GB *DDR3-1866*, процессор *Xeon E5-2690*, материнская плата *Jingsha X79 Dual Socket*, блок питания *ExeGate ServerPRO RM-800ADS*, кулер *ID-Cooling ID-CPU-SE-224-XT*, *SSD Crucial P1 CT1000P1SSD8*.

Таким образом, выбранная конфигурация сервера обеспечит стабильную работу конвейера *DevSecOps*, позволяя эффективно выполнять автоматизированный анализ безопасности, сборку и тестирование приложений. Само развертывание приложений и их эксплуатация будут выполняться на стороне заказчика или внешнего исполнителя, в то время как данный сервер будет выполнять ключевые этапы обеспечения безопасности и автоматизации процессов *CI/CD*.

Результаты. Основным новшеством статьи является разработанная авторами комплексная конфигурация *DevSecOps*-конвейера, адаптированная для использования в условиях импортозамещения. Наблюдения, полученные в ходе работы, показали, что предложенная схема позволяет эффективно выявлять уязвимости на различных уровнях: в исходном коде (*SAST*), в зависимостях

(*Dependency Scanning*), в конфиденциальных данных (*Secret Scanning*), в контейнерных образах (*Container Scanning*) и в работающем приложении (*DAST*). Ключевым результатом стала централизация управления уязвимостями через платформу *DefectDojo*, что обеспечивает единую точку для сбора, анализа и отслеживания устранения всех обнаруженных проблем.

В результате выполнения стадии отправки отчета в *DefectDojo* на дашборде актуализируется информация в виде графиков о наличии активных уязвимостей в проекте (рис. 11). Слева круговая диаграмма представляет долю выявленных уязвимостей с различной степенью критичности в общем количестве за все время существования проекта и внесения в него изменений. На линейном графике справа отображена динамика ежемесячного снижения количества выявляемых проблем.

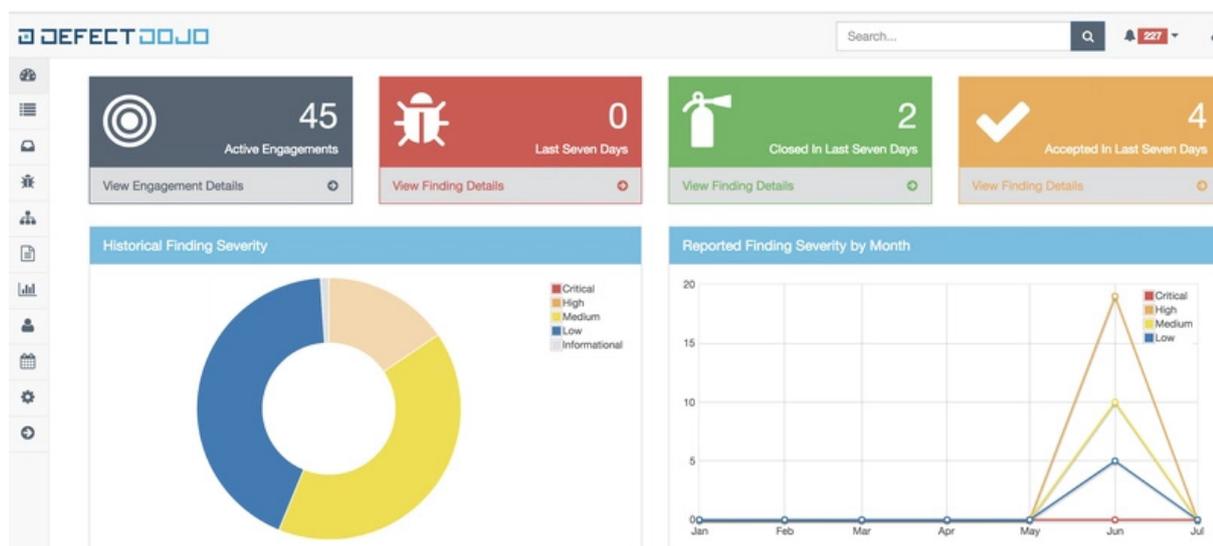


Рисунок 11 – Дашборд DefectDojo

Реализованный конвейер демонстрирует соответствие заявленной цели, обеспечивая сквозную автоматизацию процессов *CI/CD* со встроенными проверками безопасности. Техническим обеспечением решения выступил сервер на базе отечественной операционной системы *Red OS* с предложенной спецификацией аппаратных компонентов, что подтверждает практическую реализуемость и автономность предложенного подхода.

Обсуждение. Предлагаемая конфигурация *DevSecOps*-конвейера представляет собой интегрированную систему автоматизации разработки, тестирования, безопасности и развертывания приложений, которая даже малым и средним ИТ-компаниям при ограниченном бюджете позволяет осуществить полную интеграцию безопасности в *CI/CD*. Ключевыми аспектами практической значимости являются:

Полная автоматизация *CI/CD*. Весь процесс разработки и развертывания автоматизирован, а

именно, сборка приложения после сохранения изменений кода в *GitLab*, запуск тестов для проверки функциональности и производительности, создание и проверка контейнерных образов.

Интеграция безопасности в конвейер. В данном варианте реализации конвейера используются автоматизированные механизмы анализа уязвимостей с дальнейшим обеспечением централизованного управления уязвимостями.

Надежность развертывания и управления артефактами. Использование *Nexus* в качестве централизованного репозитория артефактов и контейнерных образов гарантирует развертывание и запуск только проверенных и безопасных сборок, контроль версий артефактов, минимизацию рисков использования уязвимого кода.

Гибкость и адаптивность конвейера. Конвейер не привязан к конкретному стеку технологий и поддерживает разные языки программирования и фреймворки, различные инфраструктурные

решения, возможность добавления новых инструментов безопасности и тестирования без кардинального изменения его архитектуры.

Проведенное сравнение предложенной методологии с традиционными подходами, где безопасность проверяется по завершении разработки, выявило значительное преимущество интегрированного конвейера *DevSecOps* в части снижения времени на обнаружение и устранение уязвимостей, а также сокращения совокупной стоимости владения. Сравнение с аналогичными исследованиями, такими как работы [3, 5], подтверждает общемировую тенденцию к интеграции безопасности в *CI/CD*, однако представленное в данной статье решение отличается акцентом на использовании открытого и импортозамещенного программного обеспечения, что является ответом на специфические вызовы, описанные в работе [6]. Разбор полученных результатов позволяет утверждать, что автоматизация сканирования на ранних этапах предотвращает попадание известных уязвимостей в дальнейшие стадии реализации конвейера, тем самым повышая общую надежность процесса. Обобщение опыта внедрения демонстрирует, что предложенная конфигурация является гибкой и может быть адаптирована под различные технологические стеки. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепризнанных в профессиональном сообществе инструментов анализа безопасности (*SonarQube*, *OWASP ZAP* и др.), интегрированных в реальный рабочий процесс управления кодом на платформе *GitLab*.

Выводы. В результате проведенного исследования был разработан и системно описан практический вариант конфигурации автоматизированного *DevSecOps*-конвейера. Экспериментально установлено, что интеграция инструментов статического анализа (*SAST*) в конвейер позволила значительно увеличить долю уязвимостей, выявляемых на этапе написания кода, что сократит стоимость их исправления в среднем в 5-6 раз по сравнению с устранением в рабочей среде. Практическая реализуемость подтверждена развертыванием на отечественной ОС *Red OS*, а использование открытого стека инструментов позволило достичь полного импортозамещения и сэкономить до 1,5 млн. рублей ежегодно на лицензионных отчислениях. Автоматизация рутинных задач (сборка, тестирование и развертывание) высвобождает до 10 часов рабочего времени разработчика в неделю. И в целом, количество этапов, требующих ручного вмешательства, сокращается в среднем с 7-ми до 2-х (инициализация и мониторинг). Применение всего процесса автоматизации было протестировано на примере развертывания приложения *WSO2 API Manager 4.4.0*, что продемонстрировало работоспособность конвейера в условиях реального корпоративного продукта.

В ходе тестирования созданного конвейера была проведена комплексная проверка его функциональности, корректности исполнения всех стадий, надёжности автоматизации и полноты интеграции используемых инструментов. Каждая стадия конвейера была рассмотрена как с точки зрения автоматического запуска, так и по глубине выполняемых проверок, охватывая как процессы непрерывной интеграции и доставки, так и встроенные этапы анализа безопасности. Проведённые испытания подтвердили, что *GitLab CI/CD* надёжно реагирует на изменения в репозитории и инициирует выполнение пайплайна. Это обеспечивает строгое соблюдение принципов непрерывной интеграции, при которых любые изменения в коде немедленно попадают в цикл проверки и сборки. Все испытания показали, что конвейер не только надёжно выполняет задачи по сборке, тестированию и доставке программного продукта, но и полноценно интегрирует аспекты информационной безопасности. Каждый инструмент работает как часть единой системы, а процесс от коммита до развертывания полностью автоматизирован и прозрачен. Это существенно снижает риски, повышает стабильность релизов и создаёт условия для безопасной и предсказуемой поставки программного обеспечения в производственную среду. Внедрение централизованного управления уязвимостями в *DefectDojo* позволило сократить среднее время на устранение критической уязвимости с 14 до 3 дней за счет автоматизации уведомлений и прозрачности процесса. Таким образом, к итоговым результатам работы можно отнести снижение рисков, связанных с человеческим фактором, ускорение времени вывода продукта на рынок за счет автоматизации, а также создание универсальной и адаптируемой модели, пригодной для использования ИТ-командами различного масштаба. Таким образом, предложенное решение вносит вклад в практику построения безопасных и эффективных процессов разработки программного обеспечения в современных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лукьянов А.А. Анализ методологий и инструментов непрерывной интеграции поставки для повышения эффективности сборки загрузочной среды Linux для встраиваемых систем удалённого доступа / А.А. Лукьянов // Информационно-технологический вестник. – 2023. – № 4(38). – С. 15-25.
2. Kumar P. Sher: A Secure Broker for DevSecOps and CI/CD Workflows / P. Kumar, V.K. Madiseti // Journal of Software Engineering and Applications. – 2024. – Vol. 17, No. 05. – P. 321-339.
3. Som V. Integrating Security in Cloud-Native CI/CD Pipeline: A Comprehensive Review of DevSecOps Practices / V. Som // Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing. – 2022. – Vol. 1, No. 4. – P. 1-4.
4. Kummarapurugu Ch.Sh. A Framework for Real-Time AI-Driven Secure Code Analysis Integrated with DevSecOps in Cloud-Native CI/CD Pipelines / Ch.Sh. Kummarapurugu // International journal of scientific research in engineering and management. – 2024. – Vol. 08, No. 11.
5. Reddy Chittibala D. DevSecOps: Integrating Security into

the DevOps Pipeline / D. Reddy Chittibala // International Journal of Science and Research. – 2023. – Vol. 12, No. 12. – P. 2074-2078.

6. Бондарь Д.Е. Автоматизация процессов DevSecOps в условиях перехода на отечественное ПО: проблемы и решения / Д.Е. Бондарь // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 10. – С. 59-63.

7. Sadovykh A. Enhancing DevSecOps with continuous security requirements analysis and testing / A. Sadovykh, V. Ivanov // Computer Research and Modeling. – 2024. – Vol. 16, No. 7. – P. 1687-1702.

8. Кузьмина С.П. Роль пайплайнов в современной кибербезопасности: автоматизация, защита и реагирование на угрозы / С.П. Кузьмина // Интернаука. – 2024. – 33-1 (350). – С. 9-10.

9. Зиновьев Л.Д., Каледа Р.А. Применение методов DevSecOps для интеграции безопасности в каждый этап жизненного цикла программного обеспечения / Л.Д. Зиновьев, Р.А. Каледа // Сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы». – Изд-во: Пензенский государственный университет. – Пенза, 2024. – С. 271-273.

10. Wilson G. DevSecOps. A leader's guide to producing secure software without compromising flow, feedback and continuous improvement / Rethink Press Limited. – 2024. – 280 p.

11. Киримова, А.В. Импортзамещение операционных систем: Astra Linux, Ред ОС, Роса / А.В. Киримова // Modern Science. – 2021. – № 7. – С. 286-288.

12. Башмаков А.В., Огорельцев П.А., Скорых М.А. Создание конвейера с автоматической проверкой на уязвимости веб-приложений для системы управления репозиториями программного кода gitlab / Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): Сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. В 4 т., Санкт-Петербург, Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2023. – С. 132-135.

13. Ефимов, А.А. Непрерывный контроль качества кода с помощью SonarQube / А.А. Ефимов // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 11. – С. 286-297.

14. Казанцев Е.А. Разработка системы автоматизированного анализа сторонних открытых библиотек на наличие уязвимостей в исполняемых файлах // Вестник науки. – 2025. – №6 (87).

15. Рукомин М.А., Сатюков И.О., Алферин С.Е. Интеграция тестирования безопасности в цикл непрерывной интеграции и доставки // Вестник науки. – 2025. – №4 (85).

16. Акилов М.В., Ковцур М.М., Несудимов Е.Ю., Потемкин П.А. Исследование методик обнаружения уязвимостей Web-приложений IAST и SAST / // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2021): Материалы XII Санкт-Петербургской межрегиональной конференции, Санкт-Петербург, – Санкт-Петербург: Региональная общественная организация "Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления", 2021. – С. 378-379.

17. Буренков И.А. Применение виртуальных контейнеров Docker для запуска сервисов // Литъё и металлургия. 2022. №3. – С. 108-111.

18. Rodionov K. Containerizing Python Applications Using Docker to Build A Microservice Architecture // Universum: технические науки. 2024. №6 (123). – С. 30-39.

19. Убеев В. Г. Анализ существующих механизмов контейнеризации в операционных системах // E-Scio. – 2022. – №10 (73).

20. Лапонина О.Р., Малаховский С.А. Использование сканера уязвимостей ZAP для тестирования веб-приложений // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – №8.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 004.021
EDN: DAOFAP

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ВЫПУКЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ НА МАТРИЧНЫХ ШТРИХКОДАХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЛИС

© Автор(ы) 2025
SPIN: 4552-0506
AuthorID: 1311360
ORCID: 0009-0002-4689-7506

ЕПИФАНОВ Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Электронных вычислительных машин»
Рязанский государственный радиотехнический университет им В.Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e-mail: alexlaw00@mail.ru)

Аннотация. Предлагается алгоритм коррекции выпуклых сферических искажений на матричных штрихкодах (*QR*-код, *Datamatrix*) для имплементации на ПЛИС. В основе предлагаемого алгоритма коррекции лежит метод относительных смещений, задающий однозначное соответствие центроидов пикселей искажённого штрихкода целевым пикселям на штрихкоде с учётом силы, области и центра сферического искажения. Погрешность смещения определяется доверительной окрестностью пикселя штрихкода (множество точек, попадание центроида со смещением в которые не приведёт к ухудшению итогового результата коррекции) и выражает точность работы алгоритма. Предложенный алгоритм инвариантен к размерам матричных штрихкодов и способен с одинаковой точностью и высокой скоростью обрабатывать любые матричные штрихкоды. При проведении экспериментальных исследований для различных матричных штрихкодов с различными размерами области сферического искажения (радиус искажения в разбросе от 3 до 10 пикселей штрихкода) и различной силой искажения, быстродействие алгоритма коррекции находилось в диапазоне от 202 до 291 мкс с максимальной погрешностью, не превышающей 5%, выражающей количество неверно скорректированных пикселей по отношению к общему количеству пикселей, затронутых областью искажения. В основе предложенного подхода не используются методы машинного обучения, нейронные сети, морфологические операции и тригонометрические функции, реализация которых затруднена на ПЛИС, что позволяет использовать предложенный алгоритм в промышленных сканерах штриховых кодов, имеющих ограниченное быстродействие.

Ключевые слова: коррекция выпуклых сферических искажений, физические дефекты, матричные штрихкоды, *QR*-коды, коды *Datamatrix*, ПЛИС.

ALGORITHM FOR CORRECTION OF CONVEX SPHERICAL DISTORTIONS IN MATRIX BARCODES FOR IMPLEMENTATION ON FPGA

© The Author(s) 2025

EPIFANOV Alexander Sergeevich, post-graduate student of the Department of Electronic Computers
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(390005, Russia, Ryazan, Gagarina st., 59/1, e-mail: alexlaw00@mail.ru)

Abstract. An algorithm for correcting convex spherical distortions in matrix barcodes (*QR* codes, *Datamatrix*) is proposed for implementation on FPGAs. The proposed correction algorithm is based on a relative displacement method, which defines a one-to-one correspondence between the centroids of the distorted barcode pixels and the target pixels on the barcode, taking into account the strength, area, and center of the spherical distortion. The displacement error is determined by the confidence neighborhood of the barcode pixel (a set of points where the centroid's offset position will not lead to a deterioration in the final correction result) and expresses the accuracy of the algorithm. The proposed algorithm is invariant to the size of the matrix barcodes and is capable of processing any matrix barcode with equal accuracy and high speed. During experimental studies for various matrix barcodes with varying spherical distortion area sizes (distortion radii ranging from 3 to 10 barcode pixels) and varying distortion strengths, the correction algorithm's performance ranged from 202 to 291 μ s with a maximum error not exceeding 5%, which represents the number of incorrectly corrected pixels relative to the total number of pixels affected by the distortion area. The proposed approach does not utilize machine learning methods, neural networks, morphological operations, or trigonometric functions, which are difficult to implement on FPGAs, allowing it to be used in industrial barcode scanners with limited performance.

Keywords: correction of convex spherical distortions, physical defects, matrix barcodes, *QR* codes, *Datamatrix* codes, FPGA.

Для цитирования: Епифанов А.С. Алгоритм коррекции выпуклых сферических искажений на матричных штрихкодах для реализации на ПЛИС / А.С. Епифанов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 31-40. – EDN: DAOFAP.

Введение. При обработке матричных штрихкодов (*DataMatrix*, *QR*) может появиться потребность в устранении осевой неоднородности, возникшей из-за сферического искажения полезной части кода. Сферические искажения (выпуклые, вогнутые), как правило, являются физическими де-

фектами штрихкода и обусловлены искривлением поверхности, на которую нанесён штрихкод. При достаточно сильной осевой неоднородности штрихкод считать будет невозможно, что приведет к отбраковке самого товара, на который нанесён штрихкод. Для промышленного сканера штрихкодов, установленного на конвейерной обработке с высокой пропускной способностью, такая отбраковка товаров может быть очень критичной. Вследствие чего к решениям для коррекции сферических искажений предъявляются требования как можно более высокой скорости и точности.

На данный момент задача устранения сферических искажений имеет множество решений на основе алгоритмических и нейросетевых подходов. В работах [1-2] приводятся нейросетевые способы решения задачи с использованием глубокого обучения. Работа [1] сосредотачивается на использовании пары свёрточных нейронных сетей модели *GeoNet* для устранения геометрических искажений, связанных с дисторсией, вращениями, сдвигами и проективными искажениями, что делает предложенное решение универсальным для основных типов искажений. В данной работе приводится алгоритм обучения, архитектура и оценочная метрика, выраженная в ожидаемой ошибке прогнозирования (*EPE*), находящейся в диапазоне от 1.46 до 3.19 [1].

Свёрточная нейронная сеть, предложенная в работе [2], в большей степени таргетирована на устранение сферических искажений, полученных с объективов типа «рыбий глаз». Однако описанная в работе [2] модель обучения и предложенная архитектура позволяют адаптировать весь подход для устранения сферических искажений на изображениях при условии предварительной локализации самой области искажения. Предложенное решение хуже по скорости, чем свёрточная сеть *Rong* для устранения радиальной дисторсии [3], однако превосходит её по качеству, выраженному в метриках *PSNR* и *SSIM* [2].

Из алгоритмических методов, в основе которых не лежат методы машинного обучения, стоит отметить алгоритм обнаружения искривлённых линий с последующей полиномиальной коррекцией бочкообразного радиального искажения маппингом точек, предложенный в работе [4]. Искривлённые линии определяются на основе локальных экстремумов на профиле интенсивности, построенном по изображению в направлении, близком к перпендикулярному, с последующей группировкой в параболические линии [4]. Лежащая в основе алгоритма полиномиальная модель выбрана из-за достаточно универсальной коррекции радиальных искажений с точностью до субпикселя, что накладывает высокие вычислительные затраты [4-5].

Дополнительно стоит отметить работы, изучающие методы коррекции пространственных

искажений изображений, описываемых полной аффинной группой преобразований [6-7]. В работе [6] предлагается метод определения параметров преобразования, основанный на последовательном переборе ограниченного числа характерных точек предварительно центрированного изображения объекта с учётом эталонного изображения, что может быть невозможно в ряде задач, где эталон не предусматривается. В работе [7] предлагается свёрточная нейронная сеть для работы с искажениями на сферических изображениях, полученных с помощью специализированных спутниковых платформ или БПЛА. Подходы, применяемые в работах [6-7] описывают особенности работы с радиальными искажениями и могут служить основой для реализации других решений, более предпочтительных при определённой специфике задач.

Отдельно стоит отметить семейство решений для задач устранения радиальных искажений на снимках МРТ [8-10]. В их основе лежат высокочастотные узкоспециализированные методы, учитывающие специфику съёмки и обработки снимков МРТ. Вследствие чего, например, использовать метод трёх ортогональных сеток с прямым маппингом полей [8], *MEMS*-зеркала [9] или *B*-сплайны [10] для коррекции геометрических искажений будет невозможно или нецелесообразно для задач, не готовых к высоким вычислительным затратам. Однако общие подходы и описанные условия в работах [8-10] могут лежать в основе разработки других алгоритмических или нейросетевых способов решения задачи устранения сферических искажений на изображениях.

Таким образом, рассмотренные выше решения не подходят для реализации простого, высокоточного, переносимого на ПЛИС алгоритма коррекции сферических искажений, интегрированного на промышленных сканерах матричных штрихкодов. Наиболее подходящим решением может быть метод, описанный в работе [4], однако из-за избыточно высокой субпиксельной точности полиномиального расчёта снизится быстродействие системы при повышенных вычислительных затратах.

Вследствие чего целью данной работы стала разработка узкоспециализированного относительно простого алгоритма, подходящего для задачи коррекции сферических искажений на матричных штрихкодах и пригодного для имплементации на ПЛИС. Разрабатываемый алгоритм не должен использовать методы машинного обучения, нейронные сети, морфологические операции и тригонометрические функции, реализация которых затруднена на ПЛИС и должен уметь работать с любыми матричными штрихкодами вне зависимости от их размера с допустимой точностью и приемлемой для промышленных сканеров скоростью.

Методология. В основе разработанного алгоритма коррекции сферических искажений с исполь-

зованием метода относительных смещений лежит идея, что требуемые значения пикселей кодов уже содержатся внутри самой области искажения. При последовательном проходе по всей области искажения в соответствии с решающим правилом будет определено, каким значением заполнить тот или иной пиксель, в результате чего станет возможно скорректировать сферическое выпуклое искажение без трансформации всего изображения.

Ключевым понятием в используемом решающем правиле будет смещение. Смещение – значение, на которое надо сдвинуть координату текущего пикселя кода на горизонтальной и вертикальной оси, чтобы попасть в соответствующее ей положение на искажённом изображении.

Под относительным смещением (O) следует понимать значение смещения (O_a) к ширине единичного пикселя штрихкода ($length$):

$$O = \frac{O_a}{length} \quad (1)$$

На рисунке 1 представлена иллюстрация смещения. Зелёным кругом отображён центр искажённой области, красной точкой – центр рассматриваемого пикселя штрихкода (центроид пикселя). Красная стрелка отражает целевое смещение для центра рассматриваемого пикселя штрихкода на искажённом изображении. Синие стрелки показывают, что любое смещение можно выразить через смещение по горизонтальной оси (x) и смещение по вертикальной оси (y).

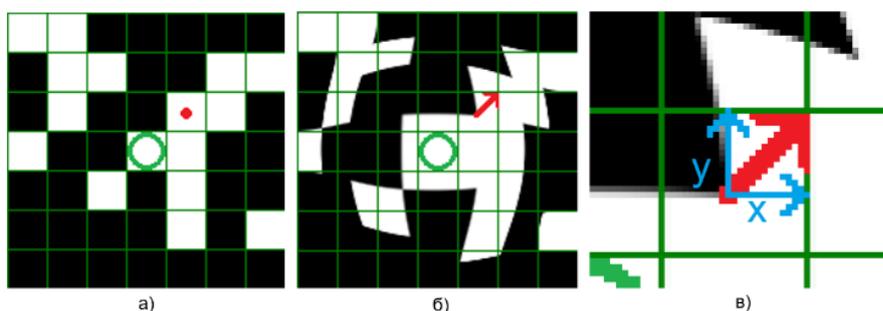


Рисунок 1 – а) изображение без искажения; б) изображение с искажением; в) смещение центра пикселя

Из-за особенностей матричной структуры штрихкода будет избыточно определять смещение для каждой координаты в области искажения. Вместо этого будут определены смещения только для центроидов каждого пикселя штрихкода. В зависимости от того, куда попадёт центроид после смещения, будет решено, каким цветом заполнять весь пиксель штрихкода – белым или чёрным. Это позволит ускорить обработку сферического выпуклого искажения и сформирует доверительную окрестность, флуктуации смещения в которой не будут негативно влиять на результат восстановления.

Под доверительной окрестностью пикселя штрихкода следует понимать множество точек, попадание центроида со смещением в которые не приведёт к ухудшению итогового результата коррекции искажения. На изображении со сферическим выпуклым искажением доверительной окрестностью является деформированный пиксель штрихкода. На рисунке 2 приведён пример доверительной окрестности пикселя штрихкода.

Красной точкой обозначается центр рассматриваемого пикселя штрихкода, красной областью – деформированный пиксель штрихкода, соответствующий рассматриваемому пикселю. Деформированный пиксель штрихкода является доверительной окрестностью, т.к. любой его пиксель определяет цвет всего исходного пикселя штрихкода.

Доверительная окрестность тем меньше, чем ближе координата пикселя к краю области искажения, т.к. к краям области искажения пиксели

штрихкода сжимаются всё сильнее.



Рисунок 2 – Пример доверительной окрестности пикселя штрихкода

Использование доверительной окрестности обусловлено тем фактом, что в предложенном методе относительных смещений вычисляются только смещения центроидов рассматриваемых пикселей штрихкода. И на основании того, куда попадут центроиды, пиксели штрихкода будут заполнены соответствующим цветом.

Для определения правила, по которому будут вычисляться смещения в зависимости от координаты центра пикселя, были вручную построены и проанализированы карты относительных смещений для искажений разной силы и размеров.

Так, например, для следующего выпуклого искажения *DataMatrix* штрихкода, карта смещений примет следующий вид (рис. 3).

В графическом виде данную карту смещений можно изобразить следующим многообразием точек (рис. 4).

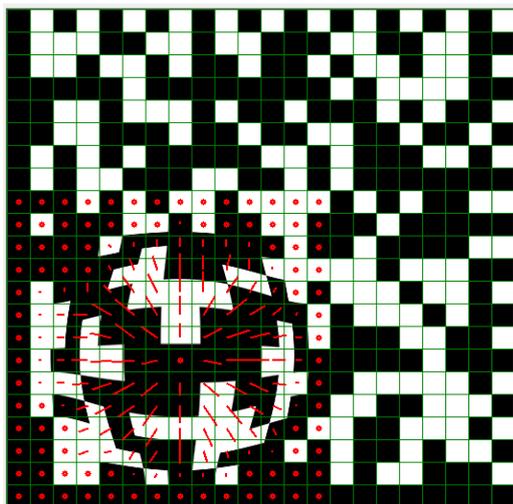


Рисунок 3 – Пример карты смещений для кода Datamatrix

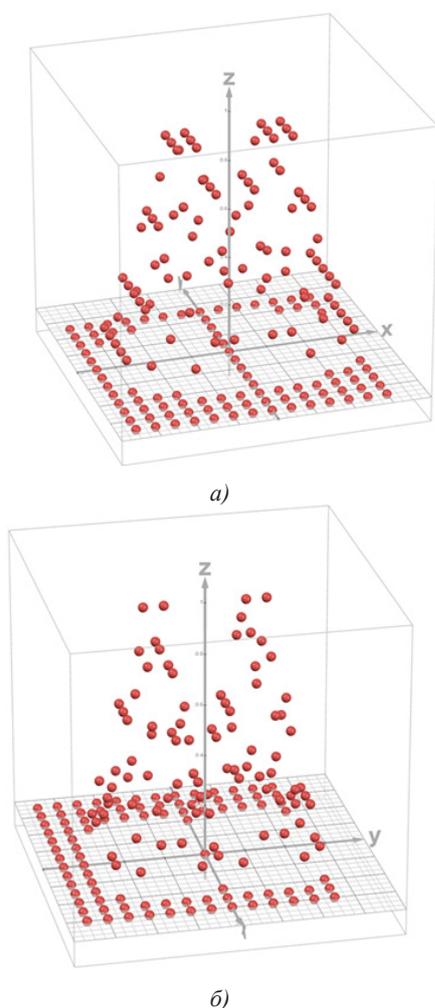


Рисунок 4 – а) многообразие относительных смещений по оси X; б) многообразие относительных смещений по оси Y

По оси абсцисс и оси ординат откладываются координаты центроида пикселя, по оси аппликат – значение относительного смещения. Нумерация координат выбрана таким образом, чтобы точка (0,0) совпадала с центром области искажения.

По данным графикам видно, что многообразие точек достаточной степени можно аппроксимировать поверхностью следующего вида [11-12] (рис. 5).

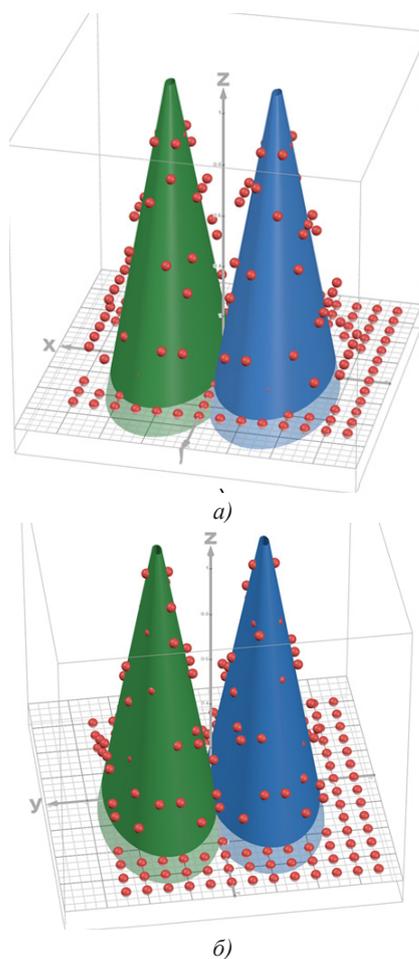


Рисунок 5 – а) аппроксимирующая поверхность относительных смещений по оси X; б) аппроксимирующая поверхность относительных смещений по оси Y

В общем виде данная аппроксимирующая поверхность задаётся следующими уравнениями [13-15]:

$$\begin{cases} O_x = z - k\sqrt{a * (x - x_t)^2 + b * (y - y_t)^2} \\ O_y = z - k\sqrt{b * (x - x_t)^2 + a * (y - y_t)^2} \end{cases} \quad (2)$$

Для данного соотношения x, y – задают координаты пикселя для осей X и Y , O_x – относительное смещение по оси X , O_y – относительное смещение по оси Y , x_t – сдвиг центра аппроксимирующей поверхности по оси X , y_t – сдвиг центра аппроксимирующей поверхности по оси Y ; z, k, a, b – числовые коэффициенты, специфичные для каждого искажения в отдельности.

По анализу аппроксимирующих поверхностей стоит отметить, что числовые коэффициенты a и b в подкоренном выражении меняются местами, что обусловлено ортогональной природой смещений O_x и O_y . Дополнительно стоит отметить, что значения сдвигов центра аппроксимирующей поверхности x_t и y_t для каждого относительного смещения

определяются соответствующей точкой перегиба по оси X или оси Y . Числовые коэффициенты z , k , a , b являются функциями, зависящими от силы и радиуса искажения.

Для аппроксимирующей поверхности наличие доверительной окрестности является фактором достаточности аппроксимации [16-18]. Поскольку расстояние от аппроксимирующей поверхности до точек, выражающих относительные смещения, не обязательно должно быть нулевым – достаточно попадания в доверительную окрестность.

Графически доверительную окрестность для многообразия относительных смещений можно изобразить следующим образом (рис. 6).

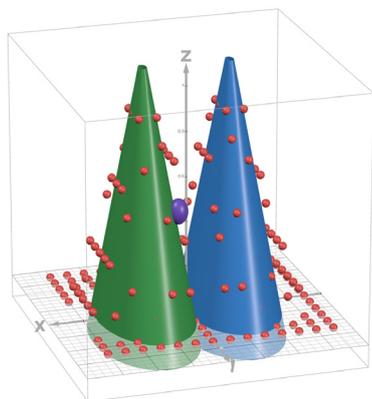


Рисунок 6 – Доверительная окрестность для многообразия относительных смещений

Графическое отображение доверительной окрестности (фиолетовая фигура) определяет некую часть пространства, каждая точка которого содержит такое же корректное значение относительного смещения для рассматриваемой координаты, что и центральная красная точка (скрыта внутри фиолетовой фигуры), выражающая самое точное относительное смещение.

Соответственно, при использовании данной аппроксимирующей поверхности достаточно следить, чтобы аппроксимирующая поверхность проходила через доверительные окрестности всех относительных смещений.

Для использования формулы 2 в методе относительных смещений требуется также вычислить сдвиги центра аппроксимирующей поверхности (x_i , y_i).

На рисунке 7 приведён пример сдвига центра аппроксимирующей поверхности по оси X (x_i). Сдвиг в противоположную сторону по оси X по модулю имеет такое же значение.

Сдвиг центра аппроксимирующей поверхности y_i аналогичным образом откладывается по оси Y для соответствующей аппроксимирующей поверхности.

Для понимания природы сдвигов x_i и y_i следует рассмотреть срез многообразия относительных смещений. Для примера будем рассматривать срез смещений, взятый по оси X (рис. 8).

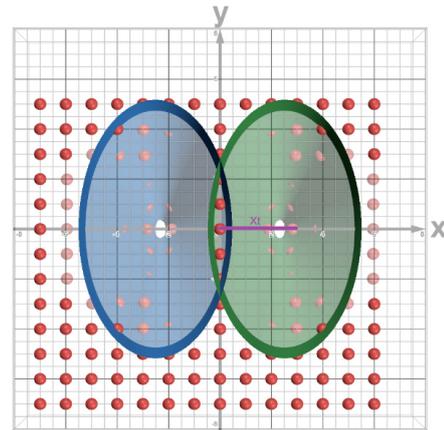


Рисунок 7 – Пример сдвига центра аппроксимирующей поверхности

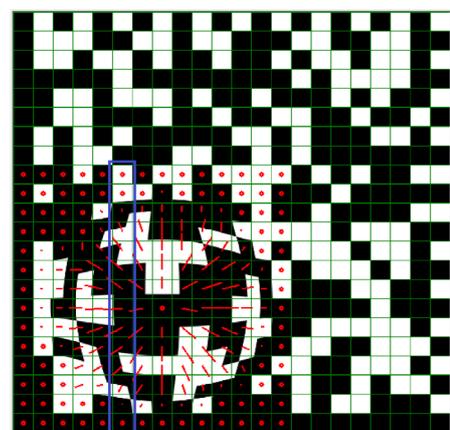


Рисунок 8 – Выбранный срез смещений по оси X

На рисунке 9 приведено распределение значений относительных смещений по оси X (синим цветом) и по оси Y (зелёным цветом) для выбранного среза. На графике по оси абсцисс откладываются координаты пикселя в выбранном срезе (где точка $(0;0)$ совпадает с центром среза), а по оси ординат – значения относительного смещения.

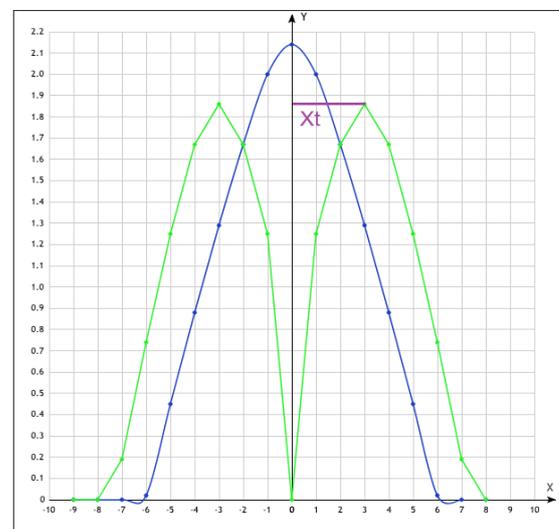


Рисунок 9 – Распределение относительных смещений для выбранного среза

Для среза по оси X значения смещений на оси X имеют строго параболический вид в силу того, что сферическое искажение тем сильнее, чем ближе к центру области искажения. Поэтому для оси X никаких сдвигов нет.

Однако, для того же среза по оси X , смещения на оси Y не имеют строго параболический вид. Это связано с необходимостью компенсирования возрастающего смещения на оси X по мере приближения к центру области искажения. Вследствие чего смещения на оси Y , достигнув соответствующей точки перегиба на x_1 или $-x_1$, начинают уменьшаться до нуля в точке $(0;0)$.

Учитывая, что результирующее смещение вычисляется как сумма смещений по оси X и оси Y и исходя из вышеописанных положений можно провести аналогичные рассуждения для среза по оси Y и модифицировать обобщённую формулу 2, исключив несуществующие точки перегиба:

$$\begin{cases} O_x = z - k\sqrt{a * (x - x_t)^2 + b * y^2} \\ O_y = z - k\sqrt{b * x^2 + a * (y - y_t)^2} \end{cases} \quad (3)$$

На штрихкодах с разными размерами области искажения и разной силой искажений эмпирически установлено, что чаще всего точка перегиба достигается на значении равном половине радиуса сферической области искажения (R):

$$\begin{cases} x_t = R/2 \\ y_t = R/2 \end{cases} \quad (4)$$

Соотношение (4) было положено в основу вычислений точек перегиба используемой аппроксимирующей функции.

Для использования обобщённой формулы 3 в методе относительных смещений осталось вычислить числовые коэффициенты z , k , a , b аппроксимирующей функции. Данные числовые коэффициенты представляют из себя зависимость от силы искажения (F) и радиуса искажения (R).

Под силой искажения (F) следует понимать степень кривизны сферического искажения, в относительных единицах выражающую максимальное относительное смещение центроида пикселя из центра области искажения. Под радиусом искажения (R) следует понимать радиус области сферического искажения.

Для определения вида зависимости были рассмотрены штрихкоды с сильно варьирующимися размерами области искажения и силы искажения.

Для полноты исследования были также рассмотрены вариации этих штрихкодов с учётом значений из доверительных окрестностей.

Графически получившиеся виды зависимостей можно представить следующими многообразиями точек (рис. 10), для которых по оси абсцисс отложена сила искажения (F), по оси ординат – радиус искажения (R), по оси аппликат – значение соответствующего параметра (P).

Данные многообразия точек можно аппроксимировать поверхностью следующего вида [19-20]:

$$P = t_1 * F + t_2 * R + t_3 \quad (5)$$

Аппроксимирующие поверхности графически можно представить следующим образом (рис. 11).

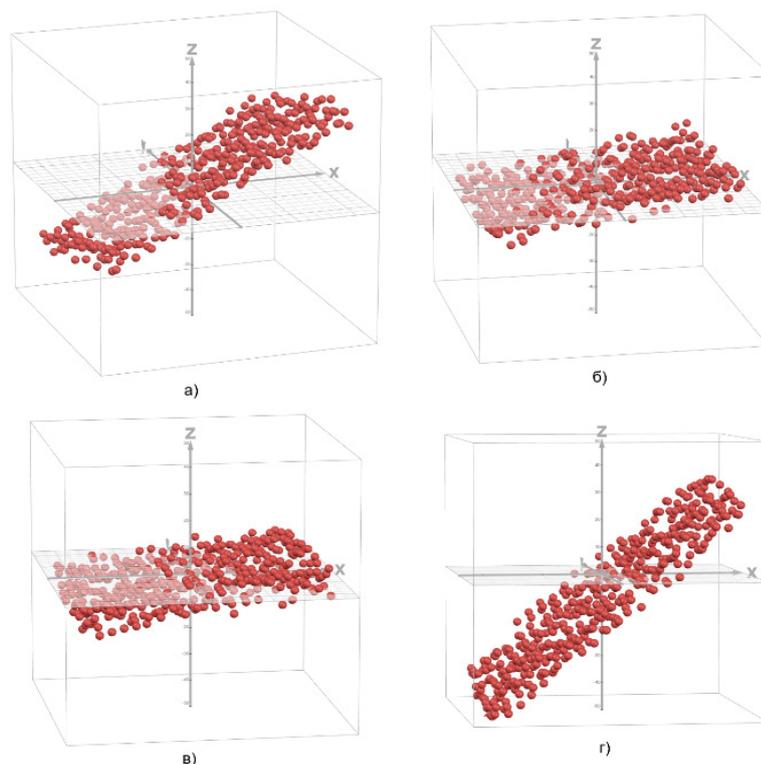


Рисунок 10 – Многообразия точек а) параметр «а»; б) параметр «b»; в) параметр «k»; г) параметра «z»

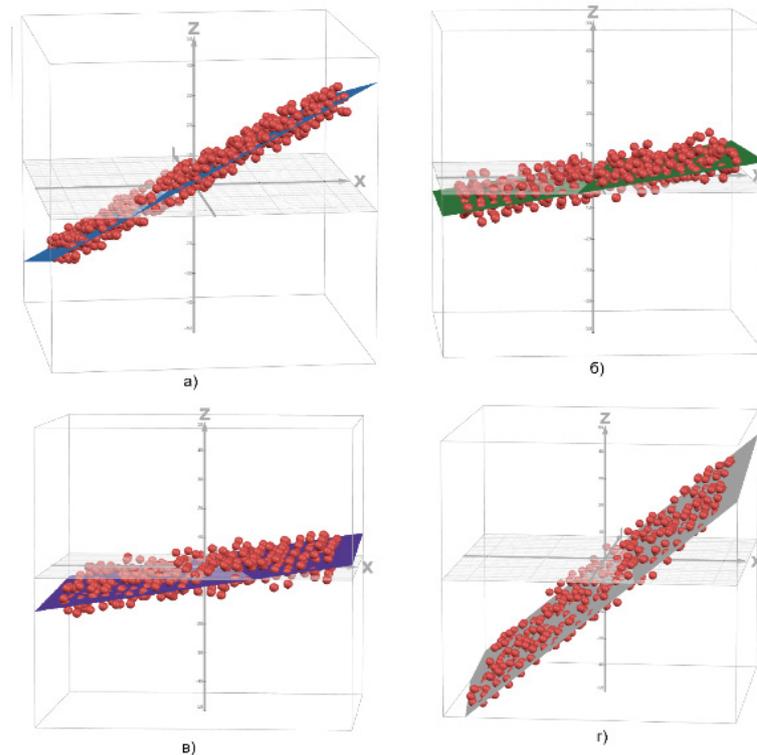


Рисунок 11 – Аппроксимирующая поверхность для многообразия точек:
а) параметр «а»; б) параметр «b»; в) параметр «k»; з) параметра «z»

Уравнения данных усреднённых аппроксимирующих поверхностей с вычисленными весовыми коэффициентами t_1, t_2, t_3 имеют следующий вид:

$$\begin{cases} a = 2.318 * F - 0.915 * R + 3.234 \\ b = 0.67 * F - 0.12 * R - 0.08 \\ k = 0.671 * F + 0.128 * R - 1.56 \\ z = 3.61 * F + 0.44 * R - 8 \end{cases} \quad (6)$$

Для матричных штрихкодов, не участвующих в выборке, для которой производился усреднённый подсчёт, вычисление параметров на основе формулы 6 оказалось достаточным в силу компенсации результатов значениями из доверительной окрестности.

Формула 6 была положена в основу вычислений числовых коэффициентов используемой аппроксимирующей функции.

В общем виде алгоритм коррекции сферических искажений может быть представлен следующей последовательностью шагов:

1. Определение размера пикселя матричного штрихкода
2. Определение области искажения, её центра и радиуса
3. Определение силы искажения
4. Коррекция области искажения методом относительных смещений

Схема предложенного алгоритма коррекции сферических искажений с использованием метода относительных смещений представлена на рисунке 12.

Таким образом предложенный метод коррекции сферических искажений предполагает вычисление

относительных смещений для центроидов каждого пикселя штрихкода в области искажения. По значению центроида, взятого со смещениями O_x, O_y , весь рассматриваемый пиксель штрихкода будет заполняться тем или иным цветом. Для вычисления относительных смещений O_x, O_y используется обобщённая формула 3 с уточнениями параметров с помощью формул 4 и 6.

Использование данных формул в общем виде не гарантирует получение идеально точного относительного смещения. Однако все ошибочные смещения с достаточной степенью компенсируются доверительной окрестностью, в пределах которой ошибки смещения не влияют на качество результата.

Схемотехническая реализация алгоритма коррекции методом относительных смещений предполагает использование конвейерной обработки, выполняющей последовательное вычисление относительных смещений с помощью специализированных блоков, реализующих операции сложения, умножения и вычитания, синтезированных из логических элементов. Общие особенности такой реализации совпадают с теми, что представлены в работе [21]. Каждая строка изображения передаётся одним UDP-пакетом. ПЛИС имеет один блок двухпортовой оперативной памяти (BRAM) для хранения каждой строки, глубина BRAM выбирается с учетом ширины изображения, выраженной количеством столбцов.

Детали схемотехнической реализации будут рассмотрены в отдельной статье.

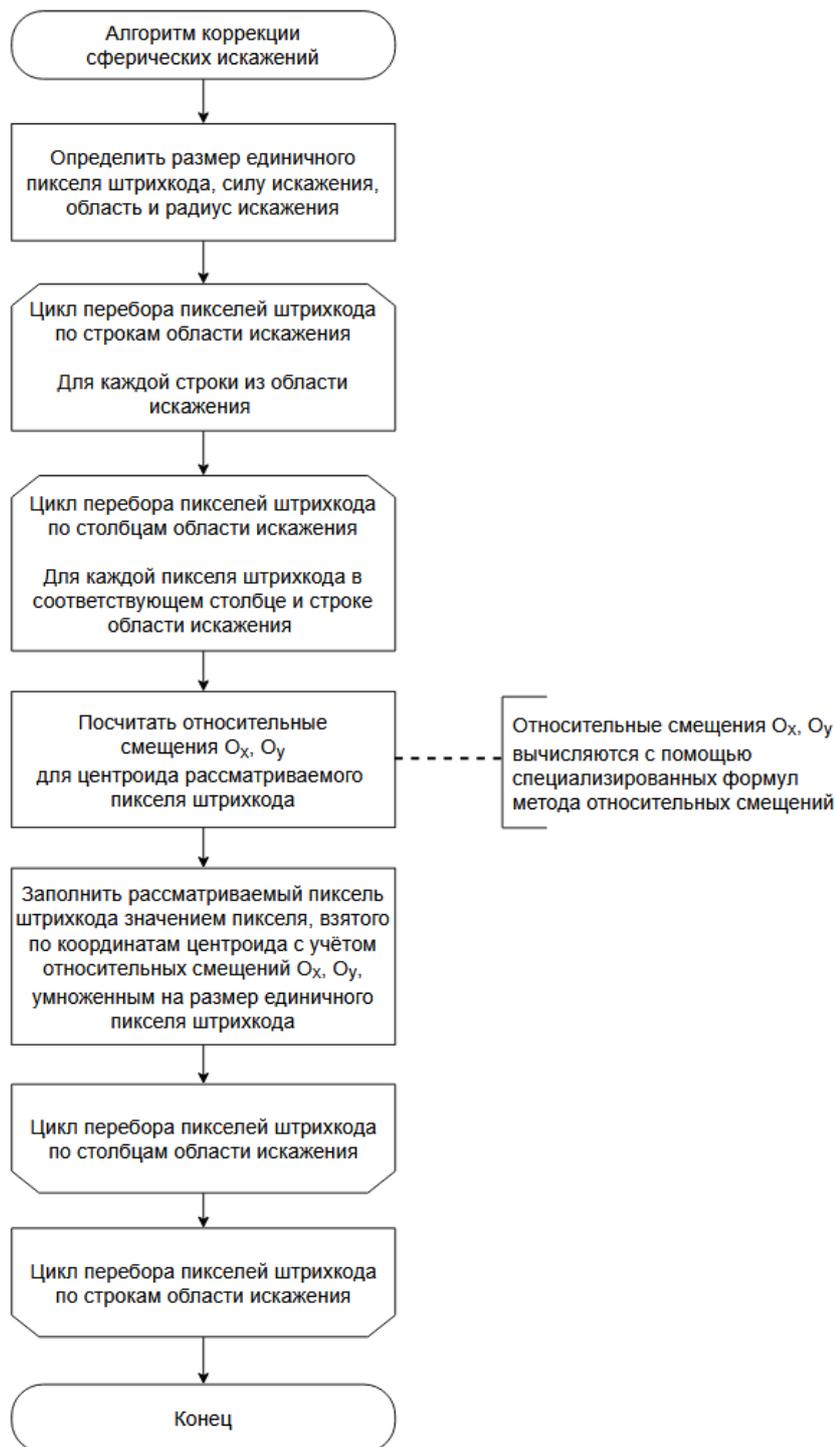


Рисунок 12 – Схема алгоритма коррекции сферических искажений методом относительных смещений

Результаты. В данной статье предложен метод относительных смещений для коррекции сферических искажений на матричных штрихкодах. Процесс реализации предложенного алгоритма коррекции не будет рассмотрен в рамках этой статьи.

При проведении экспериментального исследования были использованы матричные штрихкоды с различными размерами области искажения и различной силой искажения.

Результаты работы алгоритма коррекции приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результат работы алгоритма коррекции сферических искажений

	Время работы алгоритма	Процент ошибок коррекции
F = 1,3 и R = 3 пикселей	184 мкс	0%
F = 1.83 и R = 5 пикселей	202 мкс	0%
F = 1.67 и R = 7 пикселей	252 мкс	0%
F = 1.57 и R = 6 пикселей	254 мкс	1,18%
F = 2 и R = 7 пикселей	266 мкс	0%
F = 1,5 и R = 10 пикселей	291 мкс	4%

Графические результаты некоторых примеров представлены на рисунках 13-15. Верхнее левое изображение – оригинал; нижнее левое изображение – бинаризованное выпуклое искажение; нижнее правое изображение – карта полученных смещений; верхнее правое изображение – результат коррекции (с выводом ошибок коррекции).

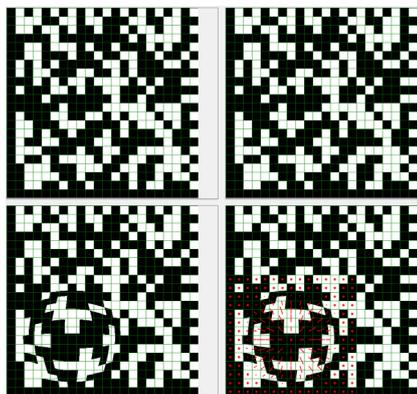


Рисунок 13 – Пример коррекции искажения с силой $F = 1.67$ и радиусом $R = 7$ пикселей (время выполнения алгоритма коррекции: 252 мкс)

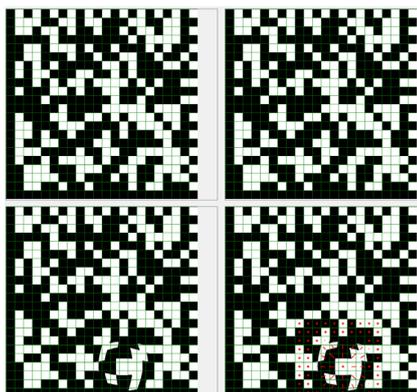


Рисунок 14 – Пример коррекции искажения с силой $F = 1.83$ и радиусом $R = 5$ пикселей (время выполнения алгоритма коррекции: 202 мкс)



Рисунок 15 – Пример коррекции искажения с силой $F = 1.57$ и радиусом $R = 6$ пикселей (время выполнения алгоритма коррекции: 254 мкс)

Как видно из примера на рисунке 15 данный алгоритм не обладает абсолютной точностью даже с учётом доверительной окрестности. Однако на всех примерах общее число ошибок не превышает 5%, что позволяет алгоритму коррекции ошибок, встроенному в сам матричный штрихкод, скорректировать невалидные пиксели и сделать возможным корректное чтение полезной части штрихкода.

Обсуждение. Разработанный алгоритм коррекции сферических искажений методом относительных смещений показывает одинаково хорошие результаты коррекции на всех матричных штрихкодах (*QR* код, *DataMatrix*) вне зависимости от их размеров. Максимальная ошибка коррекции не превышает 5%. Максимальная скорость работы алгоритма – 291 мкс для искажения с радиусом в 10 пикселей. В основе предложенного алгоритма не используются методы машинного обучения, нейронные сети, морфологические операции и тригонометрические функции, реализация которых затруднена на ПЛИС

Следует отметить, что предложенный метод относительных смещений на данный момент хорошо работает только с чётко локализованными матричными штрихкодами без каких-либо проекционных или контрастных искажений. Для полноценной работы алгоритма с учётом вышеописанных ограничений требуется предварительная обработка матричного штрихкода, устраняющая проективные и контрастные искажения. При очень большой силе искажения также наблюдаются сбои сильно выше 5%, из-за чего матричный штрихкод остаётся невалидным.

Выводы. Разработанный алгоритм коррекции сферических искажений методом относительных смещений подходит для имплементации на ПЛИС в промышленных сканерах матричных штрихкодов, т.к. обладает достаточной точностью и высоким быстродействием. В дальнейшем планируется устранение описанных выше недостатков, путём включения этапа для предварительной коррекции проекционных и контрастных искажений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Xiaoyu Li and Bo Zhang and Pedro V. Sander, Jing Liao. Blind Geometric Distortion Correction on Images Through Deep Learning // *Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV)*, 8 Sep 2019, doi: 10.48550/arXiv:1909.03459.
2. Xiaoqing Yin, Xinchao Wang, Jun Yu, Maojun Zhang, Pascal Fua, Dacheng Tao. FishEyeRecNet: A Multi-Context Collaborative Deep Network for Fisheye Image Rectification // *Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV)*, 13 Apr 2018), doi: 10.48550/arXiv:1804.04784.
3. Jiangpeng Rong, Shiyao Huang, Zeyu Shang, and Xianghua Ying. Radial Lens Distortion Correction Using Convolutional Neural Networks Trained with Synthesized Images. In *Computer Vision – ACCV 2016: 13th Asian Conference on Computer Vision*, Taipei, Taiwan, November 20-24, 2016, pp 35-49.
4. Vo, Nghia T. Discorpy: algorithms and software for camera calibration and correction. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2025, pp 718-730, doi: 10.1107/S1600577525002267.
5. Vo, N.T., Atwood, R.C. & Drakopoulos, M. Radial lens distortion correction with sub-pixel accuracy for X-ray micro-to-

mography. Opt. Express, 2015.

6. Соловьев, Н.В. Методы коррекции пространственных искажений изображений плоских объектов в условиях действия полной аффинной группы преобразований. Информационно-управляющие системы, (6), 2003, 7-11.

7. Jiang, San, Kan You, Yaxin Li, Duoje Weng, and Wu Chen. "3D Reconstruction of Spherical Images: A Review of Techniques, Applications, and Prospects." Geo-Spatial Information Science 27 (6), 2024, pp 1959–1988. doi:10.1080/10095020.2024.2313328.

8. Doran SJ, Charles-Edwards L, Reinsberg SA, Leach MO. A complete distortion correction for MR images: I. Gradient warp correction. Phys Med Biol. 2005 Apr, pp 1343-1361, doi: 10.1088/0031-9155/50/7/001.

9. Wang, D., Liang, P., Samuelson, S., Jia, H., Ma, J., & Xie, H. Correction of image distortions in endoscopic optical coherence tomography based on two-axis scanning MEMS mirrors. Biomedical optics express, 4(10), 2013, pp 2066–2077. https://doi.org/10.1364/BOE.4.002066.

10. C. Khancome and V. Boonjing, "Dynamic Multiple Pattern Detection Algorithm," 2010 Second International Conference on Computer and Network Technology, Bangkok, Thailand, 2010, pp. 48-52, doi: 10.1109/ICCNT.2010.90.

11. Панфилов Г.В., Черняев А.В. Аппроксимация трехмерных графических зависимостей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №11-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/approksimatsiya-trehmernyh-graficheskikh-zavisimostey (дата обращения: 11.10.2025).

12. Гончарова Т.В. Метод аппроксимации сложных поверхностей развертывающимися поверхностями // Universum: технические науки. 2017. №5 (38). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metod-approksimatsii-slozhnyh-poverhnostey-razvertvyvayuschimisya-poverhnostyami (дата обращения: 11.10.2025).

13. Said, M. An algorithm for extracting the geometric parameters of a right circular cone from the coefficients of its algebraic equation. Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, 14(52), 2019, pp 958-967. doi: 10.21608/aej.2019.43473.

14. Busé, L. et al. Extraction of cylinders and cones from minimal point sets. Graphical Models, Elsevier, Vol. 86, 2016, pp. 1-12.

15. Salilew, G.A. New Approach on Identification of Circular Cone. Mathematical Theory and Modeling, Vol.7, No.8, 2017.

16. Толкачев Д.С. Аппроксимация геометрических преобразований изображений с помощью многочленов. Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета. Альманах современной науки и образования. 2013. Выпуск 10.

17. Rizzo T, Wemmenhove B, Kappen HJ. Cavity approximation for graphical models. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys. 2007, doi: 10.1103/PhysRevE.76.011102.

18. Liu, L., Sheldon, D., Dietterich, T. Gaussian Approximation of Collective Graphical Models. Proceedings of the 31st International Conference on Machine Learning, in Proceedings of Machine Learning Research 32(2), 2014, pp 1602-1610.

19. Long Nguyen H, Belton D, Helmholtz P. Comparative study of automatic plane fitting registration for mls sparse point clouds with different plane segmentation methods. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W4:115–122, 2017. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-115-2017.

20. Jean-Emmanuel Deschaud, François Goulette. A Fast and Accurate Plane Detection Algorithm for Large Noisy Point Clouds Using Filtered Normals and Voxel Growing. 3DPVT, May 2010, Paris, France.

21. D.I. Ustukov, Y.R. Muratov and V.N. Lantsov, "Modification of retinex algorithm and its stream implementation on FPGA," 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Bar, Montenegro, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/MECO.2017.7977246.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 330.1

EDN: HMEMUQ

**КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЦИФРОВОГО
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ: МЕТОДЫ АНАЛИЗА, СИНТЕЗА
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2294-1372

ORCID: 0009-0007-5655-7720

ПОЛЯКОВ Николай Александрович, генеральный директор

ООО «Регион-Телеком»

(141986, Россия, Московская область, г. Дубна, проспект Боголюбова д.15 п.2, polyakov.na@yandex.ru)

Аннотация. Цель исследования – разработать концептуальную модель организационных процессов цифрового телекоммуникационного предприятия, обеспечивающую адаптивность, управляемость и самообновление в условиях высокой турбулентности внешней среды. Методология: исследование основано на системном и когнитивном подходах, критическом анализе отраслевых архитектур *eTOM* и *ODA*, концептуальном моделировании человеко-машинных контуров управления и синтезе механизмов динамического перераспределения ролей, межмодульного трансфера знаний и интеллектуальной оркестрации процессов. Результаты: разработанная модель формализована как система $M=\langle E, R, U, F, B, N \rangle$, включающая управляющий контур, замкнутую обратную связь, подсистему уведомлений, верификации и поиска причин отклонений, а также институциональные протоколы согласования изменений. В рамках модели интегрированы когнитивные технологии и стандарты *eTOM/ODA*, сформирована система метрик для оценки адаптивности, согласованности и устойчивости организационной архитектуры. Основные выводы: предложенная когнитивно-адаптивная архитектура обеспечивает саморегулирование организационных процессов, прозрачность и предсказуемость действий, а также возможность интеллектуального самообучения и постоянного совершенствования механизмов управления. Полученные результаты могут служить методологической основой для проектирования цифровых систем управления нового поколения в телекоммуникационной и смежных отраслях.

Ключевые слова: *BPMN*, бизнес-процессы, моделирование, телекоммуникационная компания, цифровая трансформация, архитектура бизнес-процессов, автоматизация, самообучение, шаблоны, корпоративные знания, адаптивные системы, организационные изменения.

**A CONCEPTUAL MODEL OF THE ORGANIZATIONAL PROCESSES OF A DIGITAL
TELECOMMUNICATIONS COMPANY: METHODS OF ANALYSIS, SYNTHESIS
AND INTELLECTUAL SUPPORT OF MANAGEMENT DECISIONS**

© The Author(s) 2025

POLIAKOV Nikolai Alexandrovich, general director

Region-Telecom LLC

(141986, Russia, Moscow Region, Dubna, Bogolyubova Avenue 15, Building 2, polyakov.na@yandex.ru)

Abstract. The purpose of the research is to develop a conceptual model of the organizational processes of a digital telecommunications enterprise that ensures adaptability, manageability and self-renewal in conditions of high turbulence of the external environment. Methodology: the research is based on systemic and cognitive approaches, a critical analysis of the *eTOM* and *ODA* industry architectures, conceptual modeling of human-machine control circuits and synthesis of mechanisms for dynamic role redistribution, intermodular knowledge transfer and intelligent process orchestration. Results: the developed model is formalized as a system $M=\langle E, R, U, F, B, N \rangle$, including a control loop, closed feedback, a subsystem of notifications, verification and search for causes of deviations, as well as institutional protocols for approving changes. Within the framework of the model, cognitive technologies and *eTOM/ODA* standards are integrated, and a system of metrics has been formed to assess the adaptability, consistency, and sustainability of the organizational architecture. Main conclusions: the proposed cognitive adaptive architecture provides self-regulation of organizational processes, transparency and predictability of actions, as well as the possibility of intellectual self-learning and continuous improvement of management mechanisms. The results obtained can serve as a methodological basis for designing new-generation digital control systems in telecommunications and related industries.

Keywords: *BPMN*, business processes, modeling, telecommunications company, digital transformation, business process architecture, automation, self-learning, templates, corporate knowledge, adaptive systems, organizational change.

Для цитирования: Поляков Н.А. Концептуальная модель организационных процессов цифрового телекоммуникационного предприятия: методы анализа, синтеза и интеллектуальной поддержки управленческих решений / Н.А. Поляков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 41-47. – EDN: HMEMUQ.

Введение. В условиях ускоряющейся цифровой трансформации телекоммуникационная отрасль сталкивается с необходимостью оперативно менять организационные процессы, обеспечивая адаптивность и устойчивость управления в высококонкурентной среде. Хотя развитие технической инфраструктуры происходит стремительно, именно организационные механизмы становятся ключевым фактором успеха цифровых преобразований. Это значимость поиска новых моделей и подходов, ориентированных на интеграцию современных методов анализа, синтеза, интеллектуальной поддержки решений и внедрения новых информационных технологий управления.

Степень разработанности темы представлена в работах ряда авторов. А.Ш. Галимова и Э.И. Валиахметова [1] подчёркивают роль стратегий цифрового развития для повышения технологической независимости телекоммуникационных компаний. М.А. Плахотникова и соавт. [2] выделяют влияние цифровизации на стратегическое управление и конкурентоспособность, указывая на необходимость постоянной адаптации компаний к изменениям среды. С.В. Казакова [3] рассматривает управление процессами на основе *eTOM* и *OSS/BSS*, но отмечает недостаточное внимание к индивидуализации и когнитивным аспектам. Ю.Ф. Тельнов и соавт. [4] предлагают онтологические методы цифровизации бизнес-процессов, обеспечивая универсальность, но без отраслевой специфики. Т.Б. Терентьева [5] акцентирует значимость адаптивных организационных структур, однако подчёркивает, что современные подходы по-прежнему ориентированы преимущественно на технологические и формальные аспекты, оставляя без должного внимания интеграцию человеческих и культурных факторов.

Несмотря на прогресс в анализе и формализации цифровых преобразований, комплексных моделей, учитывающих когнитивные технологии, социально-культурные особенности, а также интеллектуальную поддержку управленческих решений применительно к динамичным организациям телекоммуникационной сферы, пока недостаточно, что обуславливает тему исследования.

Методология. В связи с этим целью данной работы является разработка концептуальной модели организационных процессов цифрового телекоммуникационного предприятия, отражающей современные направления системного анализа, формализации, оптимизации и интеллектуализации управления. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы и архитектуры управления и выявить их ограничения с точки зрения когнитивной интеграции и адаптивности;

2. Определить принципы построения когнитивно-адаптивной организационной архитектуры,

учитывающей динамику ролей, междомдульный трансфер знаний и институциональные протоколы согласования;

3. Разработать модель управления, включающую управляющий контур, обратную связь, систему уведомлений, верификации и поиска причин отклонений;

4. Синтезировать механизмы мониторинга, анализа, генерации сценариев, согласования и корректировки решений в едином замкнутом когнитивном цикле;

5. Сформировать систему метрик, обеспечивающих количественную оценку адаптивности, согласованности и устойчивости организационной архитектуры;

6. Определить направления практической реализации модели и условия её внедрения в цифровых телекоммуникационных предприятиях.

В качестве основных методов в представленном исследовании применяется комплексный подход, сочетающий методы анализа, синтеза, индукции, дедукции, а также элементы системного анализа, что обеспечивает возможность всестороннего рассмотрения проблематики и формулирования практико-ориентированных выводов.

Результаты. Современная телекоммуникационная отрасль переживает масштабную цифровую трансформацию, требующую не только внедрения новых технологий, но и системного пересмотра всей бизнес-архитектуры. Как подчёркивает Н.Н. Масюк, это не просто технологическое обновление, а комплексная перезагрузка процессов для создания новой ценности для потребителя [6]. Такой переход предполагает не только модернизацию инфраструктуры, но и глубокие организационные и структурные изменения. Традиционные оргструктуры, прежде эффективные при стабильности рынка, стремительно теряют актуальность [7-9]. В результате возникает необходимость кардинальной трансформации управленческих культур и принципов взаимодействия, а не простой цифровизации отдельных функций [10, 11]. Ключевой барьер – не столько техника, сколько инерция старых управленческих моделей, мешающих своевременной адаптации к инновационным вызовам и ожиданиям клиентов.

Исследования показывают, что цифровая трансформация – прежде всего сложный социотехнический процесс [12], требующий согласования стратегии, культуры, структуры и внедряемых технологий. В условиях высокого темпа изменений критично значимыми становятся гибкая интеграция функций, деконцентрация и развитие горизонтальных связей.

В то же время сопротивление связано с автоматизмом традиционных практик, что указывает на необходимость пересмотра архитектуры управления и поиска средств согласования изменений.

В этой связи концептуальные модели рассматриваются как динамические инструменты «enterprise design dialogues» [13], объединяющие смысловые и коммуникационные функции для различных групп заинтересованных сторон и облегчая согласование позиций. Основные вызовы моделирования организационных изменений связаны с необходимостью принимать во внимание разнообразие взглядов участников, в том числе без глубокой предметной экспертизы.

Анализ эмпирических исследований позволяет утверждать – цифровая трансформация требует переосмысления самой структуры предприятия [14–16]. Согласно Ф.Ф. Галимулиной, А.И. Шинкевичу и Д.Р. Алимовой, основной преградой становится разрыв между традиционной управленческой структурой и логикой цифровых изменений [17]. И.В. Каблашова, И.В. Логунова и Ю.А. Саликов отмечают важность организационной перестройки для эффективности цифровых предприятий [18], а В.В. Масленников, Ю.В. Ляндау и И.А. Калинина подчеркивают стратегическую роль структуры как связующего звена между целями и практиками [19]. Всё чаще внимание уделяется экосистемному подходу: Т.О. Толстых и А.М. Агаева показывают, что успеха в цифровой экономике добиваются предприятия, действующие как элементы многослойной сети [20], а Г.Б. Клейнер и соавторы выделяют четыре ключевых подсистемы экосистем – организационную, инфраструктурную, коммуникационно-логическую и инновационную [21].

В то же время технологические стандарты и архитектуры, к числу которых относятся *Enhanced Telecom Operations Map (eTOM)* и *Open Digital Architecture (ODA) TM Forum*, направлены на стандартизацию процессов, иерархию и терминологию для обеспечения интеграции сервисных цепочек [22, 23]. Однако быстрое усложнение рынка и развитие цифровых сервисов вызвали переход к *ODA*, использующей микросервисный принцип, нормализованные *API* и интеграцию *AI/ML* [24]. Несмотря на формальные преимущества, эти архитектуры не решают проблему интеграции культурных и когнитивных факторов. Барьеры между техническими конструктами и реальными корпоративными практиками проявляются в сопротивлении изменениям и особенностях внутриорганизационного взаимодействия.

Современные решения всё чаще включают когнитивную оркестрацию: бизнес-процессы динамизированы и управляются не регламентами, а потоками, построенными на *enriched context*. Например, когнитивные фреймворки А. Сампатха реализуют цикл «перцепция-интерпретация-действие» [25]; *Cognitive BPM* по Г. Коксу и П. Менгкорну задействует *AI* для адаптации рабочих потоков в реальном времени [26], что требует осмысления этических и управленческих последствий.

В условиях растущей сложности компании переходят к гибридным моделям «человек–машина», где искусственный интеллект выполняет роль аналитического и оркестрационного ядра, а человек – стратегического наблюдателя и генератора инноваций. Принципы *Orchestrated Distributed Intelligence (ODI)*, раскрытые К. Талламом и соавт. [27], предполагают самообучение *AI*-агентов и поддержание коллективного разума за счёт распределённой сети. Практические кейсы AT&T, Rogers и других компаний подтверждают: только интеграция ИТ и бизнес-стратегии обеспечивает проактивную адаптацию и устойчивое развитие [28].

В ответ на выявленные тенденции и вызовы в работе предлагается концептуальная модель когнитивно-адаптивной организационной архитектуры цифрового телекоммуникационного предприятия, направленная на создание гибкой самообучающейся структуры, способной быстро реагировать на технологические, рыночные и регуляторные изменения.

Реализация модели базируется на комплексе инновационных организационных и технологических механизмов (табл. 1).

Представленные в таблице 1 механизмы образуют взаимосвязанную систему, где каждый элемент усиливает действие остальных, создавая синергетический эффект. Мультиплексная ролевая динамика обеспечивает операционную гибкость на уровне исполнителей, межмодульный трансфер знаний предотвращает фрагментацию экспертизы при частых реорганизациях, *AI*-оркестрация создаёт аналитическую основу для принятия решений, институциональные диалоговые сессии встраивают человеческую экспертизу в контур управления, а замкнутые циклы адаптации превращают всю архитектуру в самообучающуюся систему. В совокупности эти механизмы формируют организационную среду, способную не просто реагировать на изменения внешних условий, но и превосходить их, активно трансформируя собственную структуру и процессы.

Обсуждение. В основе модели – многоуровневая интеграция когнитивных и организационных потоков, формализованная как расширенная система $M = \langle E, R, U, F, B, N \rangle$, где E – множество элементов, R – множество связей между ними, U – управляющий контур, F – функции элементов, B – обратная связь, а N – подсистема уведомления, верификации и поиска причин отклонений. Введение дополнительного элемента N позволяет обеспечить полноту и замкнутость цикла адаптации, включающего обязательную отправку уведомлений о предложениях изменения порогов риска и *KPI*, верификацию всей цепочки действий, а также автоматизированный и человеко-машинный поиск причин непопадания в показатели с последующим предложением корректировок, а не только откатом к предыдущей конфигурации.

Таблица 1 – Ключевые механизмы концептуальной модели когнитивно-адаптивной архитектуры

Процесс/ механизм	Краткое описание технологического и организационного решения	Ожидаемый организационный эффект	Ключевые метрики / индикаторы
Мультиплексная ролевая динамика	Динамическое распределение и переподключение ролей сотрудников между модулями на основе анализа компетенций и контекста задач с применением когнитивных ИИ-алгоритмов	Повышение гибкости ресурсов, ускорение реорганизации, расширение вовлечённости	Скорость перераспределения ролей, индекс вовлечённости
Межмодульный когнитивный трансфер	Интеллектуальная автоматизированная передача знаний и лучших практик между модулями через социальные коннекторы и ИИ-аннотирование	Минимизация потерь знаний, ускорение масштабируемости лучших практик	Скорость внедрения знаний, частота межмодульных обменов
AI-оркестрация оргструктуры	Модуль искусственного интеллекта, анализирующий потоки задач, роли и аномалии; моделирует сценарии перестроек организационной структуры в реальном времени	Снижение времени на реорганизацию, оптимизация связей, проактивное устранение узких мест	Время на внедрение орг. изменений, коэффициент организационной согласованности
Институциональные диалоговые сессии	Регулярные диалоговые форматы, где ИИ-агенты и сотрудники совместно обсуждают сценарии изменений, осуществляют обмен аргументами и формируют гибридные управленческие решения	Рост согласия между ИИ и людьми; усиление роли экспертизы	Доля интегрированных обратных связей, индекс человеко-машинного согласия
Замкнутые циклы когнитивной адаптации	Вся архитектура построена на механизме когнитивной обратной связи: результаты оркестрации и человеческого участия автоматически анализируются ML-модулями, что позволяет динамически корректировать алгоритмы перераспределения ролей, назначения задач, реконфигурации процессов. Запускаются микроэксперименты – организация временных изменений структур/ролей/сервисных потоков – с автоматической оценкой KPI и быстрой отменой/масштабированием лучших решений	Постоянное самообновление; устойчивость инноваций	Скорость организационной эволюции, индекс долгосрочного успеха изменений

*составлено автором

Рассмотрим для понимания модель на конкретном процессе – подключение клиента к услуге связи. Множество элементов E включает три традиционных и одну дополнительную подсистему:

1. Организационные модули $E_o = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ – подразделения, задействованные в процессе подключения клиента: модуль обработки заявки, модуль технического обеспечения, модуль биллинга и модуль клиентской поддержки. Каждый из них реализует свою функцию $F(o_j): X \rightarrow Y$, где X – входные данные (заявка клиента, параметры услуги, статус доступности ресурсов), а Y – результат (активированная услуга, уведомление клиенту, обновление биллинговых данных). Управление деятельностью этих модулей осуществляется через когнитивный оркестратор, который на основе анализа телеметрии процессов, времени отклика и SLA динамически регулирует приоритеты, перераспределяет ресурсы и роли исполнителей, обеспечивая адаптивность и контекстность выполнения.

Таким образом, управление организационными модулями становится контекстным и адаптивным.

2. Когнитивная платформа E_c является аналитическим и управляющим ядром модели. Она состоит из трёх блоков: мониторинга c_m , оркестрации c_o и адаптации c_a . Их функции заданы так:

– блок мониторинга $F(c_m)$ обеспечивает сбор и агрегацию параметров состояния процесса подключения: время обработки заявок, загрузку каналов связи, задержки активации услуги, уровень удовлетворённости клиента и число ошибок по

этапам;

– блок оркестрации $F(c_o)$ синтезирует сценарии возможных корректирующих действий S при выявлении отклонений: перераспределение нагрузки между модулями, временное изменение маршрутов данных, подключение резервных каналов или корректировка SLA . Каждый сценарий моделируется с учётом контекста, истории выполнения аналогичных операций и возможных рисков для клиентского опыта;

– блок адаптации $F(c_a)$ формирует новые правила управления U на основе анализа динамики показателей, эффективности предыдущих итераций и выявленных рисков. Вся совокупность данных передаётся в управляющий контур, где формируются корректирующие воздействия.

3. Институциональные протоколы E_i реализуются через оператор согласования G , который преобразует множество сценариев S , предложенных оркестратором, в утверждённое множество решений S^* , принимая во внимание экспертные оценки специалистов по качеству, регуляторные ограничения и внутренние стандарты обслуживания: $G(S, H) \rightarrow S^*$, где H – множество человеческих суждений. Благодаря этому управление процессом подключения осуществляется не в режиме автоматического принятия решений ИИ, а через когнитивно-институционализированный диалог, где алгоритмические расчёты сочетаются с профессиональной оценкой специалистов.

4. Дополнительно вводится подсистема уведомления и верификации E_n , которая обеспечивает непрерывное сопровождение всех этапов подк-

лучения. Каждый акт изменения статуса заявки, маршрута данных или *SLA* фиксируется с уникальным $trace_{id}$, а информация о ходе подключения, возникающих аномалиях и временных задержках автоматически направляется ответственным модулям и руководящему звену. Через E_n реализуется механизм когнитивного контроля исполнения: система не только уведомляет о завершении операций, но и инициирует автоматическую проверку причин сбоев или нарушений *SLA*.

Множество связей R включает: R_{oo} – коннекторы между модулями обработки заявок, биллинга и технического обеспечения, обеспечивающие

передачу данных и статусов; R_{oc} – связи модулей с когнитивной платформой для передачи параметров и получения управленческих воздействий; R_{ci} – передачи сценариев на согласование; R_{io} – обратная трансляция согласованных решений в организационные модули, а также новый класс связей R_n^* , отражающий взаимодействие между когнитивной платформой, управляющим советом и подсистемой уведомлений. Эти связи обеспечивают не только движение информации снизу-вверх (инициирование уведомлений), но и обратную передачу подтверждений, корректировок и решений (табл. 2).

Таблица 2 – Матрица взаимодействий элементов модели $M=(E, R, U, F, B, N)$

Инициатор	Получатель	Тип связи	Условие срабатывания	Передаваемые данные	Результат
c_m	c_o	R_{oc}	Отклонение $> r_1$	D (телеметрия, SLA, ошибки)	Генерация сценариев S
c_o	E_i	R_{ci}	Сценарии S сформированы	S, KPI, риски	Согласование $G(S, H) \rightarrow S^*$
E_i	o_j	R_{io}	S^* утверждено	$S^*, \Delta F(o_j)$	Реализация изменений в модулях
o_j	E_n	R_n^*	Завершение операции	Y, $trace_{id}$	Верификация V_{chain} , фиксация результатов
E_n	c_a	R_n^*	Выявлены причины C	C, E_{code} , N_{report}	Адаптация $U \rightarrow U'$

*составлено автором

Таким образом, система управления U в данной модели формализуется как последовательность операторов, обеспечивающих не только генерацию сценариев и реализацию изменений, но и обязательное информирование, верификацию и корректировку. Взаимодействие реализуется следующим образом:

1. $c_m(X) \rightarrow D$, где D – множество данных о состоянии процесса подключения: время активации услуги, статусы заявок, параметры нагрузки и фиксации *SLA*. Если отклонение превышает допустимый порог r_1 (например, время активации услуги превышает норматив, клиент получает ошибку авторизации или канал недоступен), модуль мониторинга инициирует передачу данных в когнитивный оркестратор: $c_o(D) \rightarrow S$, где S – множество сценариев возможных корректирующих воздействий, включающих перераспределение заявок, изменение маршрута активации, уведомление клиента о задержке или автоматическую компенсацию. Каждый сценарий включает описание предложенного изменения, прогнозное влияние на показатели эффективности, расчёт новых значений *KPI* и порогов риска, а также временные параметры применения.

2. Далее активируется оператор уведомления N_{up} , который автоматически направляет сформированные сценарии и предложения изменений в управляющий контур для информирования руководящего звена. Одновременно выполняется запись в журнал уведомлений с идентификатором $trace_{id}$, обеспечивающим полную трассировку всех последующих действий. На основании поступивших данных инициируется процедура согласова-

ния: $G(S, H) \rightarrow S^*$, где G – оператор институционального согласования, учитывающий как машинные расчёты, так и экспертные оценки H . В результате формируется утверждённое множество решений S^* , включающее либо подтверждение изменений, либо корректировку сценариев с указанием уточнённых параметров.

3. После утверждения решений выполняется реализация S^* через перенастройку организационных модулей $o_j: S^* \rightarrow \{\Delta F(o_j)\}$, где каждый модуль получает обновлённые функции и правила работы, адаптированные к текущему состоянию системы и установленным целям. Например, изменённый приоритет очередей, перераспределение нагрузки на резервные каналы или автоматическую коррекцию параметров активации. В процессе исполнения автоматически запускается оператор верификации цепочки V_{chain} , проверяющий полноту обработки заявки, корректность маршрутов данных, своевременность уведомлений клиента и фиксацию *SLA*. При обнаружении несоответствий инициируется процедура поиска причин RC_{search} .

Поиск причин реализуется как многоуровневая процедура: $RC_{search}(logs, telemetry, trace_{id}) \rightarrow C$, где C – множество найденных причин отклонений: ошибки конфигурации, перегрузки узлов, сбои авторизации или человеческие ошибки. Если алгоритм не достигает достаточной достоверности в определении источника сбоя, активируется режим H_{search} , при котором система привлекает специалистов-экспертов соответствующих модулей для подтверждения или уточнения гипотез. В результате формируется набор найденных причин C и соответствующих им кодов ошибок E_{code} . На основании этого когнитив-

ная платформа формирует корректирующий пакет предложений, включающий не только возможный откат, но и сценарии исправления и корректировки KPI, если установлено, что текущие показатели устарели или не соответствуют изменившимся условиям.

Полученные результаты анализа и верификации передаются в модуль адаптации: $c_a(Y, KPI, C) \rightarrow U'$, где U' – обновлённое множество управляющих правил, учитывающее выявленные ошибки, подтверждённые причины и внесённые корректировки. Если интегральный показатель риска $R_s \leq r^*$, система подтверждает изменения и переходит в устойчивое состояние. Если же $R_s > r^*$, активируется механизм двойного реагирования:

– во-первых, осуществляется безопасный откат *rollback* (S^*, U) $\rightarrow U_o$, возвращающий процесс к

предыдущей стабильной конфигурации подключения;

– во-вторых, автоматически формируется уведомление о предложении корректировки порогов риска или KPI, направляемое на уровень управляющего совета с приложением аналитического обоснования, расчёта последствий и временного интервала действия изменений (TTL).

Все результаты верификации и анализа причин формализуются в отчёте обратной связи, который обеспечивает цикличность и устойчивость адаптации. В отличие от классических моделей, где обратная связь носит дискретный характер, здесь реализован многоуровневый континуальный контроль с динамическим временем реакции и типом вмешательства, зависящим от степени отклонения R_s относительно порогов r_1, r_2, r^* (табл. 3).

Таблица 3 – Механизм обратной связи и условия срабатывания

Тип отклонения	Диапазон риска R_s	Действие системы	Среднее время реакции	Участие человека
Незначительное (допуск по SLA)	$r_1 < R_s \leq r_2$	Уведомление (N_{up}), автокоррекция	≤ 5 с	Не требуется
Существенное	$r_2 < R_s \leq r^*$	Генерация сценариев S, согласование G(S, H)	≤ 30 с	Требуется подтверждение
Критическое	$R_s > r^*$	Rollback + RC_{search} + уведомление совета	≤ 10 с	Обязательный анализ

*составлено автором

Такая градация обеспечивает баланс между автономностью системы и контролем экспертов, предотвращая ошибочные автоматические решения при нестандартных ситуациях. Таким образом, формируется замкнутый цикл адаптации: $(X \rightarrow Y) \Rightarrow (Y \rightarrow U') \Rightarrow (U' \rightarrow N) \Rightarrow (N \rightarrow X)$, при котором каждая итерация не просто завершает процесс, а обогащает базу знаний системы. Все уведомления и отчёты в $N_{геронт}$ сохраняются в когнитивном хранилище, служа входом для алгоритмов мета-обучения. В результате система развивает способность к самообучению, предвосхищая возможные сбои и предлагая корректировки KPI и порогов риска ещё до фактического нарушения SLA.

Операционная конкретика модели задается разделением контуров ответственности. На стратегическом уровне решения принимает управляющий совет предприятия, определяя допустимые пороги риска r^* , например, по SLA (Service Level Agreement), регуляторным требованиям или финансовым ограничениям. На тактическом уровне когнитивный оркестратор c_o разрабатывает сценарии адаптации, координируя их с институциональными протоколами G и модулем уведомлений N_{up} . На операционном уровне организационные модули o_j реализуют утверждённые сценарии, при этом система контроля и верификации обеспечивает полноту исполнения и своевременность обратной связи.

В результате такая когнитивно-адаптивная архитектура обеспечивает не просто автоматизацию подключения клиентов, а превращает этот процесс в самообучающийся управленческий цикл, где каждое действие формирует новые знания о пове-

дении системы, а каждая ошибка становится источником улучшения алгоритмов. Управляющий контур U функционирует как динамическая когнитивная петля, объединяющая технологическую эффективность, человеческую экспертизу и институциональную надёжность, что обеспечивает цифровому телекоммуникационному предприятию устойчивое качество обслуживания, предсказуемость и способность к непрерывной эволюции.

Выводы. Разработанная концептуальная модель $M = \{E, R, U, F, B, N\}$ обеспечивает следующие ключевые преимущества по сравнению с традиционными архитектурами *eTOM* и *ODA*:

1. Замкнутость цикла управления. Введение элемента N превращает модель из реактивной в проактивную – система не просто откатывает изменения при сбоях, но автоматически выявляет причины отклонений (RC_{search}), предлагает корректировки KPI и порогов риска, обеспечивая непрерывное самообучение.

2. Формализация управляющего контура. В отличие от описательных фреймворков, модель содержит математически строгие операторы управления ($c_m, c_o, c_a, G, V_{chain}, RC_{search}$), что позволяет автоматизировать принятие решений и обеспечивает воспроизводимость результатов.

3. Институциональная интеграция когнитивных технологий. Оператор согласования $G(S, H) \rightarrow S^*$ формализует человеко-машинное взаимодействие, где ИИ генерирует сценарии, а эксперты их верифицируют, устраняя риск «чёрного ящика» автономных систем.

4. Трассируемость и прозрачность. Использование $trace_{id}$ для каждой операции и обязательная

верификация цепочки действий (V_{chain}) обеспечивают полную аудируемость процессов, что критично для регулируемых отраслей.

5. Микроитерационная адаптация. Переход от дискретных эпизодов реорганизации (месяцы-годы) к непрерывным микроитерациям изменений (дни-недели) с автоматической оценкой, масштабированием успешных решений или откатом минимизирует риски крупномасштабных ошибок и обеспечивает эволюционное развитие организации при сохранении операционной устойчивости.

Таким образом, внедрение модели позволяет не только повышать оперативную эффективность и качество обслуживания клиентов, но и формировать новый тип корпоративного интеллекта – распределённого, адаптивного и саморегулирующегося. Цепочка управления процессом становится предсказуемой и контролируемой, одновременно сохраняя способность к быстрой адаптации и непрерывной эволюции, что является критически важным для цифровых телекоммуникационных предприятий в условиях высокой волатильности рынка. Дальнейшее развитие модели предполагает разработку библиотеки операторов для других ключевых процессов (управление инцидентами, запуск новых услуг, обработка жалоб) и создание открытой платформы для обмена лучшими практиками когнитивной оркестрации в телекоммуникационной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Галимова А.Ш. Разработка концепции стратегии цифровой трансформации телекоммуникационной организации / А.Ш. Галимова, Э.И. Валиахметова // Экономика и управление: научно-практический журнал. – 2023. – № 6(174). – С. 115-118. DOI 10.34773/EU.2023.6.20.
2. Плахотникова М.А. Стратегическое управление телекоммуникационными компаниями в условиях цифровой экономики / М.А. Плахотникова, Ю.В. Вертакова, Д.В. Мухортов // Естественно-гуманитарные исследования. – 2020. – № 31(5). – С. 189-196. DOI 10.24412/2309-4788-2020-10547.
3. Казакова С.В. Анализ моделей управления бизнес - процессами телекоммуникационной компании / С.В. Казакова // E-Scio. – 2019. – № 12(39). – С. 538-544. EDN WGBGGQ.
4. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Брызгалов А.А., Федоров И.Г. Методы и модели обоснования прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий // Бизнес-информатика. – 2023. – Т. 17. – № 4. – С. 73-93. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.73.93.
5. Терентьева Т.Б. Цифровизация адаптивных организационных структур в рамках перехода к концепции «цифрового предприятия» // Прогрессивная экономика. – 2024. – № 6. – С. 159-171. DOI: 10.54861/27131211.2024.6.159.
6. Масюк Н.Н. Цифровые организационные изменения в бизнесе: научная монография Владивосток: Изд-во ВБГУ, 2024. – 186 с.
7. De Smet A., M. Lurie and A.S. George. 2018. Leading Agile Transformation: The New Capabilities Leaders Need to Build 21st-century Organizations. New York, NY: McKinsey and Co.
8. Sony M. and S. Naik. 2020. Industry 4.0 Integration with Socio-technical Systems Theory: A Systematic Review and Proposed Theoretical Model. Technology in Society 61:101248. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101248>.
9. Vial G. 2019. Understanding Digital Transformation: A Review and a Research Agenda. The Journal of Strategic Information Systems 28 (2): 118–144. <https://doi.org/10.4324/9781003008637>.
10. Shahzad K. 2020. Blockchain and Organizational Characteristics: Towards Business Model Innovation. In Advances in Creativity, Innovation, Entrepreneurship and Communication of Design: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conferences, 80–86. USA: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51626-0_9.
11. Imran F., K. Shahzad, A. Butt, and J. Kantola. 2021. Digital Transformation of Industrial Organizations: Toward an Integrated Framework. Journal of Change Management 21 (4): 451-479. <https://doi.org/10.1080/14697017.2021.1929406>.
12. Melisa Petra Benchis, Khuram Shahzad & Sorin Dan. (2025) Comparative analysis of blockchain adoption in the public and private sectors. A technology-organization-environment (TOE) framework approach. Journal of Innovation & Knowledge 10:4, pages 100746.
13. van Gils B., Proper H. A., Hoppenbrouwers S. Conceptual Modeling in Digital Transformations – Enabling enterprise design dialogues // Proceedings of the Forum at Practice of Enterprise Modeling 2022 (PoEM-Forum 2022), London, United Kingdom, November 23-25, 2022. Edited by Tony Clark, Steffen Zschaler, Balbir Barn, Kurt Sandkuhl. 2022. – P. 41-51.
14. Mitki Y., A.B. Shani, and B.E. Greenbaum. 2019. Developing New Capabilities: A Longitudinal Study of Sociotechnical System Redesign. Journal of Change Management 19 (3): 167-182. <https://doi.org/10.1080/14697017.2018.1490337>.
15. Björkdahl J. 2020. Strategies for Digitalization in Manufacturing Firms. California Management Review 62 (4): 17–36. <https://doi.org/10.1177/0008125620920349>.
16. Smith P., and M. Beretta. 2021. The Gordian Knot of Practicing Digital Transformation: Coping with Emergent Paradoxes in Ambidextrous Organizing Structures. Journal of Product Innovation Management 38 (1): 166-191. <https://doi.org/10.1111/jpim.12548>.
17. Галимулина Ф.Ф., Шинкевич А.И., Алимова Д.Р. Развитие концептуального подхода к моделированию проектных организационных структур в условиях цифровизации и перехода к циркулярной модели производства // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 9. – С. 53-57.
18. Каблашова И.В., Логунова И.В., Саликов Ю.А. Инновационное развитие системы управления предприятием в условиях цифровой трансформации // Организатор производства. – 2019. – Т. 27. – № 2. С. 46-58.
19. Масленников В.В., Ляндау Ю.В., Калинина И.А. Формирование системы цифрового управления организацией // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. – 2019. – № 6. – С. 116-123.
20. Толстых Т.О., Агаева А.М. Экосистемная модель развития предприятий в условиях цифровизации // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2020. – № 1 (33). – С. 37-49.
21. Клейнер Г.Б., Рыбачук М.А., Карпинская В.А. Развитие экосистем в финансовом секторе России // Управление. – 2020. – Т. 11. – № 4. – С. 2-15.
22. Феноменов М.А. Модели и методы управления персоналом телекоммуникационного оператора в условиях перехода к сетям 5G: диссертация ... кандидата технических наук: 2.2.15 / Феноменов Михаил Александрович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»]. Санкт-Петербург, 2025. – 159 с.
23. Гольдштейн А.Б. Концепция открытой цифровой архитектуры: эволюция или революция? / А.Б. Гольдштейн, С.В. Кисляков // Вестник связи, 2022. – № 6. – С. 22-28.
24. Кисляков С.В. Разработка бизнес-процесса подключения услуги на основе TM FORUM OPEN DIGITAL ARCHITECTURE / С.В. Кисляков, В.В. Майоров // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). Санкт-Петербург: 2022. – С. 150-156.
25. Sampath Anita & Researcher i Independent. (2025). Architecting Cognitive Computing Frameworks for Real-Time Decision Support in Enterprise Environments. 6. 7-14.
26. Cox Griffin & Pum Mengkorn. (2024). Cognitive BPM: How AI Enhances Decision-Making in Enterprise Workflows.
27. Tallam Krti. (2025). From Autonomous Agents to Integrated Systems, A New Paradigm: Orchestrated Distributed Intelligence. 10.48550/arXiv.2503.13754.
28. Benayan Mohammed & Obeidat Marsail. (2024). Understanding the digital transformation on the telecom companies and covid19 effect on the employment. International Journal of Engineering & Technology. 13. 60-67. 10.14419/mdxkfw25.

Статья поступила в редакцию 20.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК: 004.9+658.5

EDN: DVAALX

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА Q-ОБУЧЕНИЯ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАСПИСАНИЙ
ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ДИСКРЕТНОГО ТИПА ПРОИЗВОДСТВА**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9137-9717

AuthorID: 1311998

ORCID: 0009-0000-4575-3143

ОБУХОВ Константин Олегович, аспирант

Астраханский государственный технический университет

(414056, Россия, Астрахань, улица Татищева, стр. 16/1, email: kobukhov98@mail.ru)

SPIN: 5923-6280

AuthorID: 340963

ORCID: 0000-0001-7205-7231

ResearcherID: N-8607-2015

ScopusID: 55910072900

КВЯТКОВСКАЯ Ирина Юрьевна, доктор технических наук,

профессор кафедры высшей и прикладной математики

Астраханский государственный технический университет

(414056, Россия, Астрахань, улица Татищева, стр. 16/1, email: i.kvyatkovskaya@astu.org)

SPIN: 5292-8367

AuthorID: 8360

ORCID: 0009-0007-0580-5739

ScopusID: 59784012800

ПОПОВ Георгий Александрович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Информационная безопасность»

Астраханский государственный технический университет

(414056, Россия, Астрахань, улица Татищева, стр. 16/1, email: Pga_96@mail.ru)

SPIN: 2783-3236

AuthorID: 338582

ORCID: 0009-0005-7986-848X

ScopusID: 55930407600

КАРЛИНА Елена Прокофьевна, доктор экономических наук,

профессор кафедры «Производственный менеджмент»

Астраханский государственный технический университет

(414056, Россия, Астрахань, улица Татищева, стр. 16/1, email: e_karlina@list.ru)

Аннотация. Эффективность работы любого предприятия во многом зависит от производственного планирования, особенно от этапа оперативно-календарного планирования, на котором формируются детальные производственные расписания. Задача построения оптимального (или приближенного к нему) расписания значительно усложняется в дискретном производстве, характеризующемся более сложными производственными ограничениями и технологическими процессами. В работе исследуется задача построения оперативно-календарного плана для предприятий дискретного производства с дополнительными ограничениями (обработка партиями, учет переналадок и наладчиков оборудования). Среди рассмотренных авторами методов, наиболее перспективным выделены методы обучения с подкреплением. В качестве эксперимента была разработана и описана программная реализация метода Q-обучения для построения приближенных к оптимальному расписаний. Программная реализация алгоритма выполнена на языке программирования C# 12 с использованием свободной платформы .NET 8.0. Тестирование на сгенерированных данных показало, что разработанный алгоритм планирования превосходит по эффективности жадный алгоритм и не уступает методу генетического программирования, ранее реализованному авторами. В качестве дальнейших исследований предполагается доработка текущего алгоритма, а также применение более сложных методов обучения с подкреплением, таких как *DQN/Actor-Critic/Policy-Gradient*.

Ключевые слова: производственное планирование, построение расписаний, дискретное производство, теория расписаний, обучение с подкреплением, Q-обучение, оптимизация производственных процессов, машинное обучение в производстве, цифровизация производства, APS-системы, MES-системы.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE Q-LEARNING METHOD IN THE CONSTRUCTION OF PRODUCTION SCHEDULES FOR DISCRETE MANUFACTURING ENTERPRISES

© Author(s) 2025

ОБУКHOV Konstantin Olegovich, post-graduate student

Astrakhan State Technical University

(414056, Russia, Astrakhan, street Tatishcheva, 16/1, email: kobukhov98@mail.ru)

КВЯТКОВСКАЯ Irina Yurievna, doctor of technical sciences,
professor of the Department of Higher and Applied Mathematics

Astrakhan State Technical University

(414056, Russia, Astrakhan, street Tatishcheva, 16/1, email: i.kvyatkovskaya@astu.org)

ПОПОВ Georgy Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor of the Department of Information Security

Astrakhan State Technical University

(414056, Russia, Astrakhan, street Tatishcheva, 16/1, email: Pga_96@mail.ru)

КАРЛИНА Elena Prokofievna, doctor of economics, professor of the Department of Production Management

Astrakhan State Technical University

(414056, Russia, Astrakhan, street Tatishcheva, 16/1, email: e_karlina@list.ru)

Abstract. The efficiency of any enterprise largely depends on production planning, especially on the operational and calendar planning stage, where detailed production schedules are formed. The task of constructing an optimal (or approximate) schedule is significantly more complicated in discrete production, characterized by more complex production constraints and technological processes. The paper examines the task of building an operational calendar plan for enterprises of discrete production with additional restrictions (batch processing, accounting for changeovers and equipment adjusters). Among the methods considered by the authors, reinforcement learning methods are the most promising. As an experiment, a software implementation of the Q-learning method was developed and described for building schedules that are close to optimal. The software implementation of the algorithm is made in the C#12 programming language using a free platform.NET 8.0. Testing on the generated data showed that the developed planning algorithm is more efficient than the greedy algorithm and is not inferior to the genetic programming method previously implemented by the authors. Further research is expected to refine the current algorithm, as well as apply more complex reinforcement learning methods such as *DQN/Actor-Critic/Policy-Gradient*.

Keywords: production planning, scheduling, discrete production, scheduling theory, reinforcement learning, Q-learning, optimization of production processes, machine learning in production, digitalization of production, APS systems, MES systems.

Для цитирования: Обухов К.О. Экспериментальное исследование метода Q-обучения при построении производственных расписаний для предприятий дискретного типа производства / К.О. Обухов, И.Ю. Квятковская, Г.А. Попов, Е.П. Карлина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 48-57. – EDN: DVAALX.

Введение. Производственное планирование представляет собой сложный процесс, направленный на определение целей предприятия и описания действий, необходимых для их достижения. Данные цели могут быть как стратегическими, описывающими стратегию деятельности предприятия на протяжении достаточного большого срока (годы и десятки лет), так и более детальными (тактические и оперативные планы) [1]. Как правило, эти планы преемственны между собой, при этом уровень их детализации значительно увеличивается с каждым уровнем планирования. Самым детальным уровнем является оперативное планирование, по итогам которого формируются производственные расписания и сменно-суточные задания. На этом уровне уже известна производственная программа предприятия, портфель производственных заказов и графики поставок. Производственное расписание определяет, какие операции должны выполняться, в какие моменты времени и с использованием каких ресурсов (оборудование, персонал, оснастка). При этом необходимо учитывать большое количество

ограничений, таких как интервалы доступности ресурсов, их ёмкость (количество одновременно выполняемых работ), а также более специфические ограничения, которые могут отличаться от предприятия к предприятию. Горизонт планирования при этом обычно составляет не более нескольких недель, при этом процесс планирования может происходить итеративно, например, при изменении производственной ситуации (выход оборудования из строя, появление более срочного заказа).

Усложнение производства, являющееся одним из следствий четвертой промышленной революции, приводит к необходимости применения более сложных методик производственного планирования. Особенно это актуально для дискретного производства, характеризующегося более сложными технологическими процессами, которые включают в себя различные этапы обработки, сборки и транспортировки заготовок между переделами [2, 3]. Таким образом, ручное планирование становится менее эффективным, а чаще всего – невозможным из-за его сложности. Это приводит к потребности в

более эффективных инструментах для управления производством, таких как автоматизированные системы классов *ERP* (*Enterprise Resources Planning*), *APS* (*Advancing Planning & Scheduling*) и *MES* (*Manufacturing Execution System*) [4-6]. Необходимость цифровой трансформации предприятий также неоднократно подчеркивалась и на государственном уровне. На данный момент в нашей стране активно идёт процесс импортозамещения зарубежных систем управления производством отечественными аналогами.

Ядром описанных выше систем управления производством являются её алгоритмы, позволяющие строить планы определенной детализации за приемлемое время. Как правило, это различные эвристические алгоритмы, решающие задачу теории расписаний с различными дополнительными ограничениями. Данные ограничения могут варьироваться в зависимости от конкретной реализации алгоритма планирования. Чаще всего такими алгоритмами являются различные жадные эвристики или правила диспетчеризации, реже – эволюционные алгоритмы и прочие метаэвристики.

Рассматриваемая в данной работе задача построения расписания предприятия дискретного производства включает в себя как достаточно общие, так и более специфические ограничения, при этом, не являясь предметно-ориентированной на какую-то конкретную отрасль промышленности. Задается набор производственных заказов $Z = \{z_1, \dots, z_N\}$, описывающих производственные задания, каждое i -е задание ($i = 1, \dots, N$) имеет нормативные даты начала s_i и окончания d_i , а также количество обрабатываемых изделий qt_i . Технологический процесс заказа обозначается $O_i = \{o_{i,j}\}, j=1, \dots, n_i$, где n_i – количество производственных операций заказа. Помимо данных переменных, для каждого заказа задается множество значений атрибутов $AV_i = \{av_{i,l}\}$ размерностью P , описывающее значения необходимых для планирования параметров заказа. Данные параметры используются в расчете производственных переналадок, и могут представлять собой как характеристики заготовки (вид, сечение), так и производимого изделия (поставщик, марка). Значение $av_{i,l}$ должно входить в конечное множество допустимых значений v_l соответствующего вида атрибута $a_l \in A$. Между производственными заказами могут быть определены связи предшествования, которые задаются в виде матрицы смежностей PZ размерами $N \times N$, при этом ориентированный граф связей является ациклическим для каждой из компонент связности. Аналогичные связи предшествования заданы и между операциями техпроцесса каждого из заказов в виде соответствующей матрицы смежности $PO(i)$ размерами $n_i \times n_i$. При этом в каждом техпроцессе существует одна операция, называемая корневой операцией, для которой значение признака $ro_{i,j} = 1$. Операции этого же техпроцесса, выполняемые пос-

ле корневой операции, обычно служат для действий, не требующих производимых полуфабрикатов (например, чистка печи), либо для действий, связанных с побочным выходом. Вид операции, задающийся как $ot_{i,j}$, необходим для идентификации операций схожего вида для их объединения в одну партию. Для каждой операции технологического процесса задается конечное множество комбинаций исполнителей, необходимых для её выполнения, $\{mc_{i,j,k}\} k=1, \dots, \dot{n}_{i,j}$, где $\dot{n}_{i,j} > 0$ – количество комбинаций исполнителей. Каждая комбинация ресурсов характеризуется ограничениями на максимальный размер партии $mct_{i,j,k}$ (равно нулю при поштучном режиме обработки), временем обработки $t_{i,j,k}^{ex}$, подготовительным и заключительным временем $t_{i,j,k}^{pre}$ и $t_{i,j,k}^{post}$, номером основного оборудования $mmc_{i,j,k} \in M$ и вектором используемой емкости оборудования $\{cap_{i,j,k,q}\}, q=1, \dots, |M|$. Выделение основного и вспомогательного оборудования обусловлено тем, что именно основное оборудование используется при расчёте производственных переналадок (переналадки на замену оснастки являются менее распространенными, и в данной работе не описаны), а также при расчете времени на транспортировку. Каждый из ресурсов $m_q \in M$ имеет свой календарь доступности, задаваемый в виде набора окон доступности $AW_q = \{aw_{q,w}\}, w=1, \dots, wc_q$, где wc_q – количество окон доступности ресурса m_q . Каждое окно доступности $aw_{q,w}$ характеризуется временем начала и окончания окна $t_{q,w}^s, t_{q,w}^e$, а также емкостью окна $c_{q,w}$, обозначающей количество одновременно обрабатываемых операций в заданный момент времени (в зависимости от требуемой емкости соответствующей комбинации ресурсов). Кроме календаря доступности, для ресурса определен вид наладки $at_q \in \{sum, max\}$. Вид наладки используется в том случае, если ресурс определен в качестве основного, и необходим для определения метода расчета переналадки – суммирование ее длительностей или выбор максимальной длительности наладки из подходящих по матрице переналадок. Матрица наладок, обозначаемая $AM(q, l, av^{src}, av^{dst})$, возвращает длительность переналадок на ресурсе с номером q по атрибуту l при смене значения с $av^{src} \in v_l$ на $av^{dst} \in v_l$. Длительность транспортировок с ресурса q' на ресурс q определяется матрицей транспортировок $T(q', q)$. Процесс переналадки часто требует дополнительного ресурса – наладчика оборудования. В рамках описанной задачи считаем, что для каждого основного ресурса при выполнении переналадки требуется один наладчик из выбранного набора наладчиков, при этом наладчик не может быть задействован в других операциях как основной или вспомогательный ресурс. Связь ресурса-наладчика q' с ресурсом-оборудованием q обозначим в виде $Adj(q', q) \in \{0,1\}$. Планирование наладчика является достаточно сложной задачей в связи с тем, что его загрузка напрямую зависит от расположения других операций на ресурсах – при

большой номенклатуре производимых изделий и маленьком времени выполнения операций наладчики могут послужить узким местом и стать причиной простоя оборудования.

Результатом планирования являются производственные партии и интервалы переналадки. Производственные партии представлены в виде множества $B = \{b_1, b_2, \dots, b_G\}$. Для каждой партии $b_g \in B$ должны быть заданы даты начала и окончания обработки BS_g, BE_g , использованные емкости каждого исполнителя BM_g (вектор размерностью $|M|$), использованное основное оборудование $BR_g \in M$, а также заданные в виде многомерных матриц количества используемых операций и их переходы между партиями. $BO_{g,i,j}$ описывает, какое количество из q_i заказа обрабатывается в партии с номером g в рамках операции $o_{i,j}$. Матрица $BT_{g',g,i,i',j,j'}$ описывает, какое количество обработанных заготовок перешло из партии g' в партию g в рамках отношения предшествования между операциями $o_{i',j'}$ и $o_{i,j}$. Окна наладки каждого ресурса задаются в виде множества $PA_q = \{pa_{q,v}, v = 1, \dots, V_q\}$, где V_q – количество переналадок на ресурсе с номером q . Для каждого окна наладки задается время начала и окончания наладки $t_{q,v}^{ads}$ и $t_{q,v}^{ade}$.

Рассматриваемая задача планирования относится к задачам многокритериальной оптимизации, при этом каждый критерий имеет свой приоритет (лексикографическая оптимизация). Среди множества возможных критериев оптимальности выбраны два основных критерия – длительность производственных переналадок (критерий F_1) и количество заказов, нарушивших нормативную дату окончания (критерий F_2). Заказ z_i имеет нарушение сроков в том случае, когда $\forall g, j: BE_g > d_i \wedge BO_{g,i,j} > 0$. Длительность наладки складывается из длительностей всех интервалов наладки основных ресурсов. Таким образом, необходимо построить оптимальное (или приближенное к нему) расписание в зависимости от приоритета критериев F_1 и F_2 . При этом необходимо учитывать ограничения, которые можно разделить на следующие группы:

1. Корректная загрузка ресурсов – в момент времени t на ресурсе может выполняться либо одна переналадка, либо суммарное количество $cap_{i,j,k,q}$ по каждой партии, выполняемой на ресурсе в данный момент времени, не более $c_{q,w}$.

2. Корректный состав партии – все операции из партии ($\forall i, j: BO_{g,i,j} > 0$) имеют одинаковый тип операции, при этом для каждой операции существует комбинация, соответствующая выбранной комбинации исполнителей партии.

3. Корректное разбиение количества из предыдущих партий. Если $BT_{g',g,i,i',j,j'} > 0$, то $BO_{g,i,j} > 0 \wedge BO_{g',i',j'} > 0$, при этом эти значения равны в соотношении количества заказов $qt_{i'} \leq qt_i$.

4. Соответствие отношениям предшествования операций. Отношения предшествования между операциями $o_{i',j'} < o_{i,j}$ возможны при прямой зави-

симости внутри одного заказа ($i' = i, PO(i)_{j,j} = 1$), так и между заказами ($i' \neq i, ro_{i',j} = 1$).

5. Корректная длительность обработки партии в зависимости от типа обработки (штучный, партия), и количества единиц в партии.

6. Корректная длительность наладки в зависимости от типа наладки на ресурсе и значений, полученных из матрицы переналадок.

7. Корректная длительность транспортировок (не указывается явно, но учитывается при расчете старта партии).

Описанная задача планирования является задачей теории расписаний, и включает в себя комбинации ограничений из известных задач (в частности, задачи *JSSP – Job Shop Scheduling Problem* и *RCPSP – Resource-Constrained Project Scheduling Problem*), так и более специфические ограничения, не рассмотренные ранее в совокупности. К таким ограничениям относится учет переналадок и транспортировок, а также ввод нового вида ресурса – наладчика, используемого непосредственно в процессе переналадки основного оборудования.

Методология. Выбор лексикографической оптимизации как метода решения задачи многокритериальной оптимизации, обусловлен следующими причинами. Применение метода свертки, представляющим собой сведение задачи к однокритериальной оптимизации, достаточно сложно для понимания и требует нетривиального подбора подходящих весовых коэффициентов. В контексте задачи планирования производства, данные коэффициенты могут иметь переменное значение в зависимости от текущей производственной ситуации и портфеля заказов, что делает сложным применение метода свертки на практике. Применение Парето-оптимизации может быть допустимым вариантом, однако поиск Парето-фронта может потребовать большого количества вычислений, а дальнейший анализ полученного набора компромиссных расписаний может также занять много времени. Метод лексикографической оптимизации, в свою очередь, является достаточно простым методом (необходимо задать только приоритеты выбранных критериев). В дальнейшем данный метод можно будет усложнить, например, до метода уступок, введя соответствующие переменные, описывающие возможную степень уступки по более приоритетному критерию оптимальности, либо использовать описанную лексикографическую стратегию при выборе решения из Парето-фронта.

Для решения задач теории расписаний применяются различные методы, которые можно разделить на следующие группы:

1. Точные методы.
2. Правила диспетчеризации и жадные эвристики.
3. Метаэвристические методы.
4. Гиперэвристические методы.
5. Методы машинного обучения.

Точные методы, такие как полный перебор,

динамическое программирование, или метод ветвей и границ [7], как правило, невозможно применить на практике из-за высокой вычислительной сложности на относительно больших наборах данных (сотни операций/ресурсов). Для меньших размерностей найти оптимальное решение возможно, что можно использовать для сравнения с другими, менее точными, но более быстрыми методами.

В качестве противоположности точными методами можно выделить алгоритмы, основанные на жадных эвристиках [8, 9]. Такие алгоритмы являются однопроходными, и стараются выбирать оптимальный вариант в текущем состоянии алгоритма, не опираясь на долгосрочную перспективу. Процесс планирования в таком случае можно представить в виде цикла, который завершается, когда все операции уже запланированы. При этом на каждой итерации необходимо выбрать следующую операцию (*sequencing decision*) и ресурсы для ее обработки (*routing decision*). В рамках описанной в работе задачи планирования к этим выборам можно добавить третий – создавать ли новую партию для обработки или добавить в уже имеющуюся партию. Правила диспетчеризации являются по своей сути жадными алгоритмами, и описывают соответствующие стратегии выбора операций к планированию, такие как *SPT* (*Shortest Processing Time* – самое короткое время обработки), *EDD* (*Earliest Due Date* – раннее нормативное время завершения), и многие другие. Данные правила являются простыми для понимания, однако не всегда могут дать оптимальное расписание, особенно при многокритериальной оптимизации.

Метаэвристические методы представляют собой общие эвристики для нахождения близких к оптимальным решений [10]. К ним относятся эволюционные методы (генетические алгоритмы [11], алгоритм муравьиной колонии [12-13]), а также метаэвристики локального поиска, такие как метод имитации отжига [14]. Данные методы являются одними из наиболее распространенных методов решения задач построения расписаний и позволяют получить приближенное к оптимальному расписание за приемлемое время даже на больших наборах данных. К недостаткам можно отнести вероятность ухода в локальный оптимум. Некоторые из этих методов применялись и в контексте многокритериальной оптимизации (в частности, генетические алгоритмы *NSGA-II* [15] и *SPEA2*, применяемые для построения фронта Парето-оптимальных решений).

Гиперэвристические методы представляют собой подход, при котором результатом поиска является не само решение, а определенная стратегия для достижения этого решения. Данная стратегия может выражаться в виде функции расчета приоритета решения, а в более сложных сценариях – сгенерированным фрагментом кода или полноценной программой для его поиска. Чаще всего для решения

этой задачи используют уже упомянутые ранее генетические алгоритмы – метод генетического программирования, при котором хромосомой является стратегия поиска решения. В рамках задачи планирования, это могут быть закодированные в определенной форме (например, в форме дерева выражений) правила поиска операций или ресурса [16]. Преимуществом этого подхода можно назвать его универсальность, а также возможность повторного использования уже полученных стратегий поиска решений. Метод генетического программирования для решения схожей задачи планирования дискретного производства был рассмотрен авторами в [17].

Применение методов машинного обучения является очень актуальным направлением, особенно при решении задач производственного планирования. При этом методы обучения с учителем не всегда применимы на практике, так как далеко не все предприятия собирают необходимые статистические данные [18]. Однако в некоторых случаях «учителем» может являться детально воссозданная в цифровом варианте производственная система. Такие методы относятся к отдельной группе – методам обучения с подкреплением. Обучение с подкреплением представляет собой способ машинного обучения, при котором агент (роль которого выполняет испытуемая модель) взаимодействует со средой (некоторой виртуальной системой, описывающей деятельность производства) и обучается на основании сигналов подкрепления, получаемых при выполнении определенных действий. Действием является принимаемое агентом решение (выбор операции к планированию, выбор исполнителей для операции), которое влияет на текущее состояние системы (количество запланированных операций, загрузка и текущее состояние оборудования). В зависимости от выбранного действия, агент получает соответствующую награду, значение которой может зависеть от изменения соответствующих критериев оптимальности.

К наиболее известным алгоритмам обучения с подкреплением относятся:

1. *Q-Learning* – алгоритм основан на формировании у агента функции полезности Q , которая позволяет ему выбирать стратегию поведения с учетом опыта предыдущего взаимодействия со средой. При этом стратегия основывается на использовании жадного, *softmax*, или иных подходов.

2. Продолжением развития идей алгоритма *Q-Learning* можно считать применение для аппроксимации Q -функции глубоких нейронных сетей. Такие сети называют *Deep Q-Networks* (*DQN*-сети).

3. Методы *Policy-Gradient*. В отличие от *Q-Learning*, целью которого является обучение функции полезности действия, *Policy-gradient* направлен на оптимизацию стратегии $\pi_{\theta}(s|a)$, представляющую собой распределение вероятностей выбора

каждого из действий при нахождении среды в соответствующем состоянии. Оптимизация данной стратегии происходит посредством градиентного подъема.

4. Метод *Actor-Critic*. Включает в себя два основных компонента – *Actor* (формирует политику поведения агента) и *Critic* (оценка путем расчета функции ценности). Как правило, в качестве этих компонентов выступают отдельные нейронные сети. При этом обучение происходит итеративно, на основе обратной связи – *Actor* обновляется, чтобы максимизировать значение вознаграждения на следующих итерациях, *Critic* обновляется для минимизации разности между фактическим вознаграждением, и его оценкой ожидаемого вознаграждения.

Применение различных методов обучения с подкреплением при решении задач производственного планирования является достаточно новым и активно исследуемым направлением. В работе [19] для решения задач *JSSP* предлагается применение глубокого обучения на основе метода *Actor-Critic*, каждый из компонентов которого реализован в виде отдельной нейронной сети, при этом используется метод параллельного обучения и *DDPG* (*Deep Deterministic Policy-Gradient*). Отмечается, что оценка планирования разработанного метода составляет от 80 до 90% в зависимости от среды (статика, динамика) на стандартных наборах данных. В [20] также описывается метод *Actor-Critic*, но на основе двух сетей *LSTM* (сети долгой краткосрочной памяти) и проксимального градиента политики (*Proximal Policy-Gradient*). Для обучения агентов также могут использоваться графовые нейронные сети [21]. Использование *DQN*-сетей описано также в работе [22], в которой предлагается подход на основе *Double Deep Q-Network* и техники приоритизированного опыта (*Prioritized Experience Replay* – назначение большего приоритета более важным вариантам, т.е. действиям с большей наградой).

В качестве метода, применяемого для решения задачи планирования, был выбран алгоритм обучения с подкреплением *Q-Learning*, который достаточно просто реализовать на любом языке программирования без применения специализированных библиотек для работы с алгоритмами машинного обучения. Основная суть алгоритма заключается в итеративном выборе действия агентов в зависимости от значений *Q*-таблицы. Значение *Q*-таблицы зависит от текущего состояния среды и выбранного действия. Выбор агентом действия основывается на значении *Q*-таблицы и определенной стратегии выбора (например, жадная или эpsilon-жадная стратегия). Обновление *Q*-таблицы происходит согласно уравнению Беллмана $Q(s,a)=r+\gamma \max_{a'} Q(s',a')$, где $Q(s,a)$ – ожидаемое значение *Q*-таблицы при выбранном состоянии s и действии a , r – величина получаемой награды, $\gamma \in [0;1]$ – коэффициент

дисконтирования, описывающий важность будущих наград, $\max_{a'} Q(s', a')$ – максимальное значение *Q*-таблицы для всех возможных действий a' из следующего состояния s' . Помимо данных параметров, также задается скорость обучения $\alpha \in [0;1]$ и значение параметра исследования $\epsilon \in [0;1]$ (при применении эpsilon-жадной стратегии).

Результаты. Для применения метода *Q-Learning* необходимо определить множества возможных состояний и действий, доступных в данных состояниях. Состояние расчета в конкретный момент времени может быть описано различными параметрами, такими как текущая длительность наладок в расписаниях, общий прогресс планирования и т.д. При этом важно, чтобы количество состояний было конечным и относительно небольшим. Большой объем пространства состояний может привести к сложностям при хранении *Q*-таблицы в памяти, при этом эти данные лишь с очень малой вероятностью будут использованы повторно при обучении. Малый объем пространства состояний, в свою очередь, может сильно ограничить агента, что тоже может привести к низкой эффективности его обучения. В качестве эксперимента для кодирования состояния среды был выбран следующий набор метрик:

1. Прогресс расписания, выражаемый в процентном соотношении запланированного количества к требуемому количеству. Округляется до 10%.
2. Суммарная длительность переналадок в часах. Округляется до 10 часов.
3. Текущее количество опоздавших заказов в процентном соотношении к их общему количеству. Округляется до 10%.
4. Текущая длительность расписания. Округляется до 10 часов.

Выбранная структура состояний (числа в определенном диапазоне) также очень хорошо подходит для использования нейросетевыми методами, что позволит в будущем использовать другие методы обучения с подкреплением. Округление до десятков (часов, процентов) необходимо с целью группировки схожих состояний, незначительно отличающихся друг от друга.

Доступное действие представляется в виде следующих параметров:

1. Стратегия работы с партией (добавить в текущую партию, или создать новую партию обработки).
 2. Выбранная комбинация ресурсов (основное оборудование + оснастка + ресурс-наладчик).
- Общая схема разработанного алгоритма *Q-Learning* для задачи планирования представлена на рисунке 1.

Каждый тренировочный запуск (их количество корректируется переменной N_{ep}) происходит моделирование цикла построения расписания на основе текущих значений *Q*-таблицы и их последующего обновления. В начале каждого запуска

формируется очередь операций, представляющая собой последовательность кортежей $\{i, j, aq_{i,j}\}$, где $aq_{i,j}$ – доступное к планированию количество полуфабрикатов, обрабатываемых производственной операцией $o_{i,j}$. Совокупное множество доступных действий рассчитывается на основе возможных действий для каждой операции (учитывается возможность добавления в партию/создания новой партии на подходящих комбинациях исполнителей). После выбора действия (случайным образом, либо посредством выбора максимального значения из $Q(s,a)$), очередь операций обновляется ($aq_{i,j}$

уменьшается для запланированной операции и увеличивается для следующих операций в соответствии с выраженными в технологических маршрутах ограничениями предшествования). Расчет возможных действий выполняется отдельным модулем – планировщиком ресурсов, оперирующий полученными производственными данными, такими как запланированные партии, их состав, загрузка ресурсов, наладки и транспортировки. Данная информация используется для расчета минимально возможных дат планирования партии и требуемой наладки с использованием заданных ресурсов.

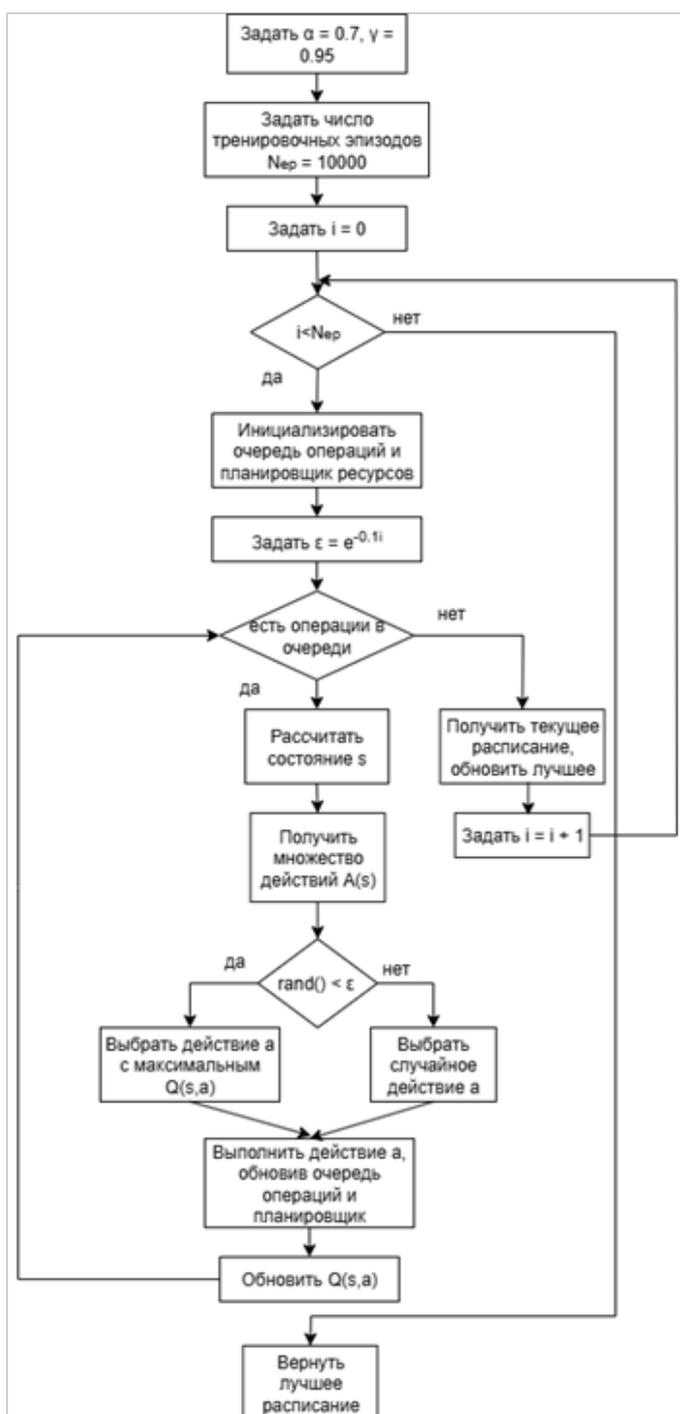


Рисунок 1 – Общая схема работы алгоритма

В процессе обучения агент оптимизирует стратегию выбора альтернативных решений с целью построения оптимального производственного расписания. Для этого применяются значения Q -функции, полученные за прошлые итерации в соответствии с уравнением Беллмана. Для расчета награды за выбранное действие применяются количественные характеристики альтернативного решения, выражаемые критериями F_1 и F_2 , а именно, их степени изменения Δf . Значение Δf_1 рассчитывается как:

1. Длительность переналадки при создании новой партии ($t_{q,v}^{ade} - t_{q,v}^{ads}$ на основном оборудовании с номером q при добавлении интервала наладки с номером v – в противном случае равно 0).

2. $\Delta f_1 = 0$ при добавлении в уже существующую партию (считается, что наладка уже запланирована при необходимости в рамках первого случая).

Для расчета Δf_2 (количество опоздавших заказов) при планировании операции o_{ij} на партию с номером g проверяется условие нарушения нормативной даты заказа $BE_g > d_i$. Если это условие верно (имеется нарушение заказа, но на предыдущей итерации плана условие было ложным), то $\Delta f_2 = 1$, иначе $\Delta f_2 = 0$. Совокупное значение критериев оптимальности сворачивается в значение награды r с использованием весовых коэффициентов $\omega_j = \{10^{-1}, 10^{-3}\}$, подобранных эмпирическим путем для сохранения диапазона наград в диапазоне $[-1; 1]$ на сгенерированных наборах тестовых данных. Итоговое значение награды умножается на -1 , так как ухудшение критерия оптимальности (увеличение его значения) приводит к отрицательной награде. При условии, что все значения $\Delta f = 0$, значение награды $r = 1$. Описанную методику расчета награды можно применить на

различные критерии оптимальности в различном порядке, зная формулы расчета каждого критерия и степени его изменения. Разработанный алгоритм инвариантен относительно предметной области и может применяться для построения расписаний для различных предприятий, производственные процессы которых можно привести к постановке рассматриваемой задачи. Выбор конкретных критериев оптимальности, их лексикографический порядок может быть задан пользователем в зависимости от текущей производственной ситуации, либо при сценарном планировании «что, если».

Описанный алгоритм был реализован на языке программирования *C#12* с использованием свободной платформы *.NET 8.0*. Было произведено несколько тестовых запусков алгоритма на сгенерированных наборах данных. Сгенерированные данные включали в себя от 7 до 15 несвязанных между собой производственных заданий, каждое из которых содержит 5 операций. Количество основных ресурсов, вспомогательных ресурсов и ресурсо-наладчиков равно 5 (общее количество ресурсов – 15). Количество для обработки в каждом заказе выбиралось случайно от 100 до 200, аналогично случайным образом генерировались потребности в ресурсах и режимы обработки партиями (максимальное количество в одной партии от 100 до 500).

Совместно с разработанным алгоритмом, на тех же наборах данных были произведены запуски жадного алгоритма и алгоритма на основе метода генетического программирования. Критерий F_1 – длительность переналадок в часах (первый приоритет), F_2 – количество нарушивших срок заказов (второй приоритет). Результаты тестовых запусков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты тестовых запусков

№ запуска/Алгоритм	Жадный			Q-Learning			Генетическое программирование		
	Т, сек.	F1	F2	Т, сек.	F1	F2	Т, сек.	F1	F2
1	0,12	31,13	8	209,22	26,87	8	36,37	28,13	8
2	0,02	100,07	7	196,12	92,47	8	40,92	88,67	7
3	0,02	38,8	6	141,88	36,07	6	23,05	37,07	5
4	0,04	22,77	10	370,75	19,33	11	56,74	21,77	11
5	0,01	25	6	184,24	25	6	28,83	25	6
6	0,02	8,07	5	157,46	7,67	5	27,32	7,67	5
7	0,03	38,65	9	311,94	32,33	10	69,68	37,77	10
8	0,01	18	7	145,22	18	7	32,26	18	6
9	0,02	77,8	8	219,4	63,73	8	40,37	62,53	8
10	0,02	25,8	9	311,33	21,3	9	62,16	21,9	9

Обсуждение. Как видно из результатов экспериментального исследования, разработанный алгоритм на основе Q -обучения позволяет находить приближенные к оптимальному расписания за приемлемое время. В сравнении с жадным алгоритмом, алгоритм Q -обучения работает медленнее (около 4 минут в среднем, в то время как жадный алгоритм работает менее секунды), при этом полученные расписания эффективнее по переналадкам в среднем на 10-15%. Длительность расчета можно

скорректировать за счет изменения параметра N_{ep} , но при этом может снизиться его эффективность. Для выбранной структуры состояний и действий на приведенных наборах данных Q -таблица может занимать достаточно большой объем оперативной памяти (до нескольких гигабайт), что также может ухудшить масштабируемость для больших наборов данных.

В сравнении с методом генетического программирования эффективность в целом одинакова – в 5

случаях из 10 алгоритм Q -обучения незначительно лучше (в районе 5%). В 2 случаях по переналадкам незначительно лучше метод генетического программирования, и в одном случае – лучше по количеству невыполненных в срок заказов. В 2 случаях алгоритмы получили расписания с одинаковыми значениями критериев оптимальности.

В качестве улучшений текущего алгоритма можно выделить дальнейшие исследования по структуре состояний (введение новых параметров или изменение методики расчета уже имеющихся параметров состояния), а также более усложненную логику расчета награды. Для большей масштабируемости следует рассмотреть более продвинутые методы, такие как DQN -сети или методы на основе $Policy-Gradient/Actor-Critic$. Обучение нейронной сети при этом может потребовать еще большего количества вычислительных ресурсов, но при этом может построить более оптимальные расписания. Для проверки этой гипотезы необходимо провести дополнительные исследования, однако уже на текущем этапе можно сделать вывод о применимости методов обучения с подкреплением для решения поставленной задачи планирования.

Выводы. В рамках данной работы был проведен анализ задачи оперативного производственного планирования для предприятий дискретного производства с дополнительными ограничениями на производственные переналадки. Проведен краткий анализ различных методов, применяемых для решения задач построения расписаний, по итогам которого был выбран метод обучения с подкреплением. Построена схема и описана программная реализация разработанного алгоритма планирования на основе метода Q -обучения. Согласно полученным результатам тестовых запусков, разработанный алгоритм строит более эффективные производственные расписания в сравнении с жадным алгоритмом, однако является более медленным на небольших наборах данных, при этом имеет приблизительно одинаковую эффективность в сравнении с методом генетического программирования. Таким образом, алгоритм Q -обучения может быть применен для решения задач построения производственных расписаний.

Последующими направлениями исследований могут быть как улучшение текущего алгоритма Q -обучения (эксперименты со структурой состояния или расчета наград), так и применение более сложных методов (DQN , $Policy-Gradient$, $Actor-Critic$), требующих достаточно длительного (в сравнении с $Q-Learning$) обучения нейронной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Жигалова В.Н. Планирование на предприятии: учебное пособие / В.Н. Жигалова. – Томск: ФДО, ТУСУР, 2021. – 164 с.
2. Шамилева Э.Э., Шаркова О.А. Исследование типов производства // Инновационная наука. – 2015. – №11-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tipov-proizvodstva>

(дата обращения: 05.10.2025).

3. Загидуллин Р.Р. Планирование машиностроительного производства. М.: изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2020. – 392 с.

4. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP: монография / Р.Р. Загидуллин. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 372 с.

5. Юсупова, Р.И. Роль информационных систем в оптимизации логистики и цепочек поставок / Р.И. Юсупова, Р.С. Зарипова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 7, № 4(145). – С. 170-175. – DOI 10.36871/ek.up.r.2024.04.07.024. – EDN CGBDCW.

6. Фролов, Е.Б. Промышленный софт для планирования машиностроительного производства: ERP, APS, MES / Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин // Конструкторское бюро. – 2021. – № 4. – С. 50-59. – EDN UYSBVN.

7. Кротов, К.В. Алгоритм метода ветвей и границ оптимизации расписаний выполнения пакетов заданий в конвейерных системах / К.В. Кротов // Информационно-управляющие системы. – 2023. – № 2(123). – С. 15-26. – DOI 10.31799/1684-8853-2023-2-15-26. – EDN WXXRRW.

8. Кузнецова, Е.А. Алгоритм оптимизации процессов формирования производственного расписания предприятий позаказного производства / Е.А. Кузнецова, И.Р. Харескин, И.О. Князева // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 1(40). – С. 13-14. – DOI 10.26102/2310-6018/2023.40.1.008. – EDN NWDWLA.

9. Гончаров, Е.Н. Стохастический жадный алгоритм для задачи календарного планирования с ограниченными ресурсами / Е.Н. Гончаров // Дискретный анализ и исследование операций. – 2014. – Т. 21, № 3(117). – С. 11-24. – EDN SDMTTPR.

10. Щербина, О.А. Метаэвристические алгоритмы для задач комбинаторной оптимизации (обзор) / О.А. Щербина // Таврический вестник информатики и математики. – 2014. – № 1(24). – С. 56-72. – EDN VLKCFZ.

11. Кибзун, А.И. Генетический алгоритм размещения требований в задаче планирования производственных процессов потокового типа / А.И. Кибзун, В.А. Рассказова // Программные продукты и системы. – 2025. – № 1. – С. 27-38. – DOI 10.15827/0236-235X.149.027-038. – EDN CFSUZO.

12. Данилов, А.Д. Применение муравьиного алгоритма в интеллектуальной системе диспетчеризации дискретного производства / А.Д. Данилов, В.А. Ломакин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14, № 4. – С. 7-11. – EDN XWHHW.

13. Li, Ye. Modified ant colony algorithm for job shop scheduling problem / Ye. Li, N. Wang, K. Xu // International Journal of Industrial and Systems Engineering. – 2024. – Vol. 46, No. 4. – P. 475-508. – DOI 10.1504/ijise.2024.138026. – EDN QGFZUZ.

14. Chaotic Multi-Objective Simulated Annealing and Threshold Accepting for Job Shop Scheduling Problem / Ju. Frausto-Solis, L. Hernández-Ramírez, G. Castilla-Valdez [et al.] // Mathematical and Computational Applications. – 2021. – Vol. 26, No. 1. – P. 8. – DOI 10.3390/mca26010008. – EDN OBPUSY.

15. Vital-Soto, A. A multi-objective mathematical model and evolutionary algorithm for the dual-resource flexible job-shop scheduling problem with sequencing flexibility / A. Vital-Soto, M.F. Baki, A. Azab // Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2023. – Vol. 35, No. 3. – P. 626-668. – DOI 10.1007/s10696-022-09446-x. – EDN DVOGVB.

16. Evolving Scheduling Heuristics via Genetic Programming with Feature Selection in Dynamic Flexible Job-Shop Scheduling / F. Zhang, Y. Mei, M. Zhang, S. Nguyen // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2021. – Vol. 51, No. 4. – P. 1797-1811. – DOI 10.1109/TCYB.2020.3024849. – EDN PXCFJQ.

17. Обухов, К.О. Метод генетического программирования решения задачи оперативно-календарного планирования дискретного производства / К.О. Обухов, И.Ю. Квятковская, А.В. Морозов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 6(242). – С. 42-52. – DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-42-52. – EDN EHFRQQ.

18. Трыков, А.В. Анализ возможностей применения методов машинного обучения для производственного планирования / А.В. Трыков // Естественно-гуманитарные исследования. – 2024. – № 5(55). – С. 637-642. – EDN DT-

CXLI.

19. Liu, Ch.L. Actor-Critic Deep Reinforcement Learning for Solving Job Shop Scheduling Problems / Ch.L. Liu, Ch.Ch. Chang, Ch.Ja. Tseng // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 71752-71762. – DOI 10.1109/access.2020.2987820. – EDN UHCYBW.

20. Monaci, M. An actor-critic algorithm with policy gradients to solve the job shop scheduling problem using deep double recurrent agents / M. Monaci, V. Agasucci, G. Grani // European Journal of Operational Research. – 2024. – Vol. 312, No. 3. – P. 910-926. – DOI 10.1016/j.ejor.2023.07.037. – EDN QIHCCH.

21. Learning to schedule job-shop problems: representation and policy learning using graph neural network and reinforcement learning / Ju. Park, Ja. Chun, S.H. Kim [et al.] // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, No. 11. – P. 3360-3377. – DOI 10.1080/00207543.2020.1870013. – EDN XKYTDR.

22. Han, B.An. Research on Adaptive Job Shop Scheduling Problems Based on Dueling Double DQN / B.An. Han, J.Ju. Yang // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 186474-186495. – DOI 10.1109/access.2020.3029868. – EDN ROKIAK.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 004.896

EDN: KLRXUM

**МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ КОНТЕЙНЕРНЫХ
ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ С ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ
НАГРУЗКИ В СРЕДАХ С КОНТЕЙНЕРНОЙ ВИРТУАЛИЗАЦИЕЙ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7610-3221

AuthorID: 1303925

ORCID: 0009-0008-4237-8593

ScopusID: 57208000002

ЧЕМАШКИН Федор Юрьевич, аспирант

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая,
д. 29, литера Б, e-mail: fedor@chemashkin.ru)*

SPIN: 3971-3180

AuthorID: 9458

ORCID: 0000-0003-4088-4798

ScopusID: 6603839750

УСТИНОВ Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор,
профессор «Высшая школа программной инженерии»

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая,
д. 29, литера Б, e-mail: usm50@yandex.ru)*

Аннотация. В статье представлена и экспериментально обоснована модель адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений в среде *Kubernetes*, основанная на интеграции методов теории автоматического управления (ПИД-регулятор) и машинного обучения (прогноз нагрузки на основе *Random Forest*). Проектирование модели адаптивного масштабирования (автоскейлинга) основывается на интеграции ПИД-регулятора и машинным обучением для проактивного управления контейнерами. Цель исследования – разработать модель и прототип в виде *Kubernetes*-оператора для проактивного управления ресурсами при переменной нагрузке. Практическая значимость заключается в повышении производительности высоконагруженных приложений, таких как платформы электронной коммерции. Разработана система управления в виде *Kubernetes*-оператора, реализующая предложенную модель, которая включает в себя ПИД-регулятор и прогностическую модель нагрузки на основе алгоритма *Random Forest*, которая обеспечивает снижение задержки отклика с 300 мс до 80 мс (на 73%) и экономию ресурсов на 25%. Проведено экспериментальное тестирование в кластере *Kubernetes* (10 контейнеров, Яндекс.Облако), подтвердившее достижение целевых показателей (задержка <100 мс, использование CPU <80%).

Ключевые слова: адаптивное масштабирование, *Kubernetes*, ПИД-регулятор, машинное обучение, облачные приложения, виртуализация контейнеров, прогностическая модель, операторы.

**MODEL OF ADAPTIVE SCALING FOR CLOUD-BASED CONTAINERIZED APPLICATIONS
BASED ON PID CONTROLLERS WITH A PREDICTIVE LOAD MODEL IN CONTAINERIZED
VIRTUALIZATION ENVIRONMENTS**

© The Author(s) 2025

CHEMASHKIN Fedor Yurievich, phd student

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, intracity municipal district Akademicheskoy, Polytechnicheskaya str., 29B,
e-mail: fedor@chemashkin.ru)*

USTINOV Sergey Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor,
professor at the Higher School of Software Engineering

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, intracity municipal district Akademicheskoy, Polytechnicheskaya str., 29B,
e-mail: usm50@yandex.ru)*

Abstract. The paper presents and experimentally validates a model for adaptive scaling of cloud containerized applications in a *Kubernetes* environment, based on the integration of control theory methods (PID controller) and machine learning (load prediction using the *Random Forest* algorithm). The design of the adaptive autoscaling model combines PID control with machine learning to enable proactive container management. The main objective is to develop a model and a prototype implemented as a *Kubernetes* operator for proactive resource control under variable workloads. The practical significance lies in improving the performance of high-load applications such as e-commerce platforms. The developed control system integrates a PID controller with a predictive load model based on *Random Forest*, achieving a

reduction in response latency from 300 ms to 80 ms (by 73%) and a 25% decrease in resource consumption. Experimental testing in a *Kubernetes* cluster (10 containers, Yandex.Cloud) confirmed the target performance indicators (latency < 100 ms, CPU utilization < 80%).

Keywords: adaptive autoscaling, *Kubernetes*, PID controller, machine learning, cloud applications, container virtualization, predictive model, operators.

Для цитирования: Чемашкин Ф.Ю. Модель адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений на основе ПИД-регуляторов с прогностической моделью нагрузки в средах с контейнерной виртуализацией / Ф.Ю. Чемашкин, С.М. Устинов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 58-65. – EDN: KLRXUM.

Введение. Современные веб-приложения и облачные сервисы работают в условиях быстро меняющейся и зачастую непредсказуемой нагрузки. Сценарии пикового потребления будь то сезонные распродажи, рекламные кампании или внезапное внимание пользователей к продукту приводят к резкому увеличению числа запросов и потребляемых ресурсов [1, 2]. В таких условиях классические механизмы масштабирования в контейнерных средах, таких как *Kubernetes*, основанные на фиксированных пороговых значениях метрик, прежде всего *Horizontal Pod Autoscaler (HPA)* и *Vertical Pod Autoscaler (VPA)* [3], демонстрируют ряд ограничений.

Во-первых, использование только одной метрики, такой как утилизация процессора или памяти, не позволяет полноценно оценить реальную производительность сервиса. Во-вторых, механизмы масштабирования по порогу зачастую реагируют с запаздыванием: пока среднее значение нагрузки не превысит порог, система не начнет добавлять ресурсы, что приводит к росту задержек и снижению качества обслуживания пользователей. После прохождения пика нагрузки, напротив, ресурсы часто остаются выделенными слишком долго, что создает перерасход ресурсов, в том числе финансовых, для компаний-эксплуатантов.

Кроме того, современные приложения становятся всё более сложными с точки зрения архитектуры и межсервисных взаимодействий. Появляется необходимость учитывать не только отдельные показатели нагрузки, но и их динамику, взаимосвязь с временными паттернами потребления и даже внешние факторы (например, поведение пользователей в зависимости от времени суток или дня недели).

Исходя из описанных ограничений, можно сделать вывод, что классические механизмы масштабирования в контейнерных средах являются по своей природе реактивными, что приводит к задержкам в принятии решений о масштабировании, временным провалам по *p95-p99*-перцентильям задержки и избыточному потреблению вычислительных ресурсов после стабилизации системы [4-6]. Пересоздание подов в *Kubernetes* при вертикальных корректировках ограничивает применимость *VPA* при кратковременных пиках нагрузки [4], а архитектуры с комбинацией *HPA* и *VPA*

улучшают утилизацию ресурсов, но не устраняют инерционность [5].

В публикациях [7-12] показано, что внедрение ПИД-регулирования (*PID*) в контуры масштабирования (автоскейлинга) позволяет ускорить переходные процессы, что существенно сокращает время реакции системы и сгладить колебания числа реплик. ПИД-регулятор учитывает не только текущее отклонение от целевой метрики, но и интеграл и производную ошибки, что обеспечивает более устойчивое управление. Применение ПИД-регулирования, однако, требует тщательной настройки коэффициентов (K_p , K_i , K_d), а также адаптации логики управления к особенностям *Kubernetes*.

Однако в типичных реализациях в области применения ПИД-регулирования в контейнерных средах остаются нерешенные вопросы: (i) настройка коэффициентов (K_p , K_i , K_d) в условиях шумных измерений и нестационарной нагрузки; (ii) учет дискретного и запаздывающего механизма применения изменений в *Kubernetes* (*reconciliation loop*); (iii) связь управляющих воздействий не только со средними значениями утилизации вычислительных ресурсов (*CPU*, память), но и с *SLO*-применимыми метриками.

Параллельно в ряде исследований, например [13-17], акцент делается на предиктивном масштабировании, когда система заранее прогнозирует рост нагрузки на основе временных рядов и запускает процесс масштабирования проактивно. Для прогнозов используются различные алгоритмы:

- скользящие средние и экспоненциальное сглаживание;
- статистические модели для прогнозирования временных рядов *ARIMA* (авторегрессионная интегрированная модель скользящего среднего) и *SARIMA* (расширение, учитывающее сезонные колебания);
- рекуррентные нейронные сети (*RNN*, *LSTM*).

Решения, основанные на машинном обучении, обладают существенным потенциалом, однако в практических реализациях часто возникают сложности:

- с точностью прогнозов;
- необходимостью значительных вычислительных ресурсов для обучения и переобучения моделей, что напрямую связано с финансовыми затратами;

– недостаточная интеграция прогноза с динамикой объекта управления, в которой зачастую прогноз применяется как внешний сигнал, без связки с внутренними состояниями сервиса и ограничениями исполнительных механизмов объекта (облачное ПО) и среды (*Kubernetes*).

В совокупности анализ существующих решений показывает несколько структурных и архитектурных недостатков:

– распространение классических «одномерных» инструментов масштабирования в контейнерных средах, опирающихся на метрики вычислительных ресурсов;

– отсутствие проактивности в управлении подами приложений в *Kubernetes*, в том числе в их масштабировании;

– недостаточная устойчивость в нестационарных состояниях систем из-за ограниченной адаптации встроенных классических инструментов к изменяющимся профилям нагрузки;

– отсутствие интеграции между разными моделями управления процессами масштабирования (автоскейлинга).

В связи с этим возрастает актуальность разработки новых моделей управления масштабированием и ресурсами. Такие подходы должны обладать способностью:

– предсказывать изменение нагрузки на основе исторических данных;

– адаптивно регулировать количество выделенных ресурсов в реальном времени;

– учитывать динамические и нелинейные зависимости между показателями.

Это обуславливает актуальность разработки модели адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений в средах с контейнерной виртуализацией, объединяющих методы теории автоматического управления (ТАУ) и машинного обучения (ML). Объединение алгоритмов автоматического управления, например ПИД-регуляторов, с методами машинного обучения открывает возможности для создания гибких систем автоскейлинга, которые способны одновременно быстро реагировать на пиковую нагрузку и предотвращать избыточное выделение вычислительных мощностей. Такая интеграция может стать одним из ключевых факторов повышения устойчивости и эффективности облачных сервисов в высококонкурентной среде.

Методология. Настоящая работа продолжает развитие методов и моделей адаптивного управления облачными приложениями в средах с контейнерной виртуализацией, предлагая экспериментальное сравнение традиционного автоскейлинга и комбинированного решения, основанного на интеграции ПИД-регулятора с прогнозной моделью машинного обучения (ML-модуль). Цель исследования – разработка модели адаптивного масштабирования и реализация прототипа в форме *Ki-*

ubernetes-оператора на основе ПИД-регулятора и прогностической модели нагрузки для управления облачными контейнерными приложениями.

Задачи включают в себя:

– разработка математической модели динамики ресурсов и аномалий;

– интеграция ПИД-регулятора с ML-модулем для упреждающего масштабирования;

– экспериментальная оценка производительности системы в *Kubernetes*;

– формулировка рекомендаций по внедрению.

Научная новизна заключается в создании модели интеграции ПИД-регулятора и машинного обучения для управления контейнерами, в которой применяется теория автоматического управления для упреждающего масштабирования в *Kubernetes*. Практическая значимость заключается в снижении задержек на 73%, экономии ресурсов на 25% и упрощении внедрения в ИТ-компаниях.

Для обоснования применяемых методов представлен обзор архитектуры *Kubernetes*, базовых принципов работы *Horizontal Pod Autoscaler*, а также теоретические основы ПИД-регулирования и применения моделей машинного обучения в задачах предсказания и управления нагрузкой. Такое рассмотрение позволяет детально понять, какие преимущества и ограничения характерны для каждого подхода, и на каком основании была разработана экспериментальная модель комбинированного автоскейлинга.

Kubernetes представляет собой систему оркестрации контейнеров с открытым исходным кодом, широко используемую для управления кластером распределённых приложений. Основные абстракции *Kubernetes* включают:

– *Pod* (под) – минимальная единица развертывания, содержащая один или несколько контейнеров;

– *ReplicaSet* – объект, поддерживающий заданное количество реплик подов;

– *Deployment* – декларативный способ управления *ReplicaSet* и стратегиями их обновления;

– *Service* – абстракция для доступа к наборам подов по стабильному *DNS*-адресу.

Масштабирование в *Kubernetes* может быть горизонтальным (*HPA*), вертикальным (*VPA*) и кластерным (*Cluster Autoscaler*). В рамках данной работы используется *HPA*, как базовый механизм автоскейлинга.

HPA управляется метриками, получаемыми от *metrics-server* или внешнего источника (например, *Prometheus* через *custom metrics API*). Наиболее часто используемая метрика – среднее потребление *CPU*. *HPA* отслеживает текущую нагрузку и масштабирует количество реплик подов, чтобы достичь заданного порогового значения метрики.

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный) является классическим элементом теории автоматического управления. В контексте масштабирования (автоскейлинга)

ПИД-регулятор позволяет более точно и адаптивно реагировать на изменения нагрузки по сравнению с *HPA*, который основывается на усреднённых значениях метрик и работает по принципу гистерезиса. В отличие от *HPA*, ПИД может учитывать как скорость изменения нагрузки (дифференциал), так и накопленную ошибку во времени (интеграл), что повышает устойчивость при пиковых или скачкообразных нагрузках.

Использование машинного обучения в задачах масштабирования становится все более популярным. В контексте данной работы применяются простые обученные модели для прогнозирования нагрузки на основе временных рядов. Прогнозируемые значения используются в качестве входных параметров для ПИД-регулятора, что позволяет заранее предсказывать рост нагрузки и уменьшать время реакции системы.

Модель может быть реализована на базе алгоритма линейной регрессии, градиентного бустинга (*XGBoost*) или *LSTM* для работы с временными рядами. При этом следует учитывать, что *Random Forest* показывает эффективность на небольших обучающих выборках, легко интерпретируем и позволяет быстро классифицировать типы перегрузок (*CPU*, сеть, задержка и т.д.). В отличие от *LSTM*, который ориентирован на прогнозирование временных рядов и требует больших объёмов данных и существенных вычислительных ресурсов, *Random Forest* обеспечивает компромисс между точностью классификации и скоростью обучения, что важно для онлайн-адаптации ПИД-регулятора.

Интеграция машинного обучения (*ML*-модуль) позволяет создавать предиктивное масштабирование, что особенно актуально в ситуациях с периодической или резко возрастающей нагрузкой (например, онлайн-распродажи, премьеры стриминговых сервисов и пр.).

Для интеграции ПИД-регулятора в модель адаптивного масштабирования необходимо разработать математическую модель динамики ресурсов. Динамика ресурсов контейнеров (*CPU*, память, сеть) моделируется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -aC(t) + bU(t) + cR(t),$$

где $C(t)$ – загрузка *CPU* (%), $U(t)$ – управляющий сигнал (число потоков), $R(t)$ – интенсивность запросов (запросов/с), $a = 0,1$, $b = 0,2$, $c = 0,01$ – эмпирические коэффициенты. Устойчивость системы обеспечивается при $a + bK_p > 0$, где $K_p = 0,5$ – пропорциональный коэффициент ПИД-регулятора.

Управляющий сигнал формируется следующим образом:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $e(t) = C_{ref} - C(t)$, $C_{ref} = 70\%$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,05$. Адаптивная настройка коэффициентов выполняется на основе метрик нагрузки $R(t)$ и рекомендаций *ML*-

модуля.

Прогностическая модель нагрузки *ML*-модуль на основе *Random Forest* классифицирует аномалии, которая может быть описана, как $Y \in \{0, 1, 2, 3\}$ соответствую норме, перегрузке *CPU*, проблем с сетью, высокой задержке с точностью 95%. Вектор признаков $X(t) = [C(t), M(t), N(t), L(t), R(t)]$ обрабатывается ансамблем из 100 деревьев с энтропийным критерием:

$$H = - \sum_{k=0}^3 p_k \log_2(p_k).$$

Модель корректирует K_p , K_i , K_d минимизируя функционал качества

$$J = \int_0^T (e^2(t) + 0.01L^2(t) + 0.05C^2(t)) dt.$$

На рисунке 1 показан конвейер разработки и применения *ML*-модуля. На этапе офлайн-обучения формируется датасет из скользящих окон телеметрии сервисов (количество запросов, *p95/p99*-задержка, ошибка, длина очередей, утилизация *CPU* и памяти, число реплик, события *readiness/liveness probe*). Для каждого окна вычисляются статистические и динамические признаки (средние/квантили, производные, автокорреляции, сезонные индикаторы «час/день недели»). Разметка выполняется по фактам нарушений и эталонным нагрузочным сценариям.

В онлайн-режиме модуль каждые 5-10 секунд формирует окно признаков и классифицирует состояние системы. Блок адаптации переводит классификацию в управляющие действия ПИД-регулятора (K_p , K_i , K_d).

На рисунке 2 показана архитектура разработанного прототипа *Kubernetes*-оператора. Оператор реализован стандартно как *Custom Resource Definition (CRD)* и кастомный *Kubernetes*-контроллер на базе *reconcile*-цикла. Во время работы модуль мониторинга агрегирует *CPU*, *RAM*, запросы. *ML*-модуль оценивает прогностическую нагрузку, ПИД-регулятор вычисляет целевое число реплик (и/или лимиты ресурсов). Также оператор обращается к *Kubernetes API* для применения сформированных управляющих воздействий (масштабирование), используя стандартные механизмы *Kubernetes*. Все решения представляется в виде записей журнала событий в события кластера и экспортируются в метрики для последующего аудита.

Экспериментальная среда для тестирования *Kubernetes*-оператора, разработанного для валидации модели адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений, представляет собой контролируемую инфраструктуру, развернутую на облачной платформе Яндекс.Облако.

Она включает кластер *Kubernetes* версии 1.25, состоящий из трех рабочих узлов (каждый с 4 виртуальными процессорами и 8 ГБ оперативной памяти), на которых запущено 10 контейнеров, эмулирующих *REST API* типичного приложения для электронной коммерции.

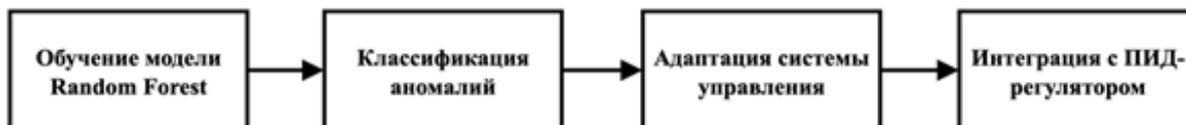


Рисунок 1 – Конвейер ML-модуля

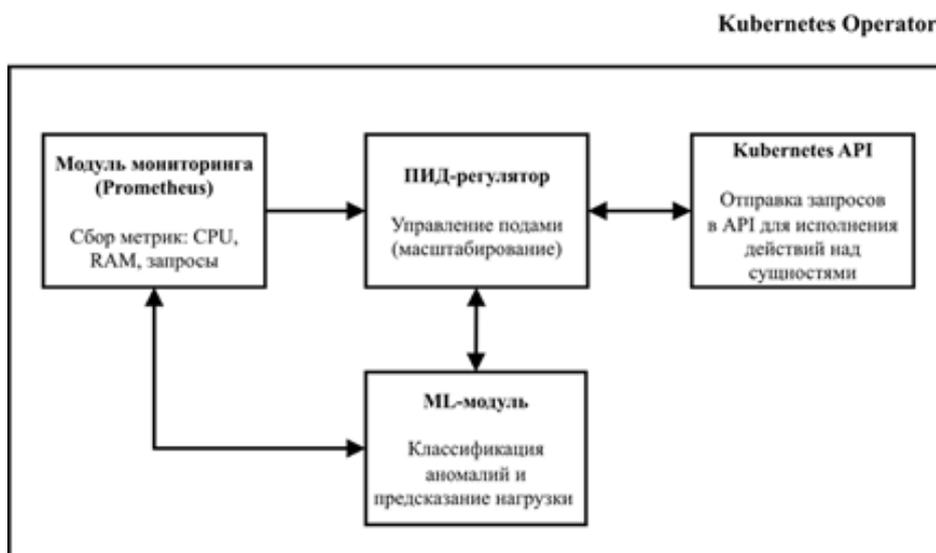


Рисунок 2 – Архитектура promotuna Kubernetes-оператор

Для генерации нагрузки использовался инструмент *Locust*, обеспечивающий моделирование сценариев с интенсивностью запросов от 100 до 10 000 запросов в секунду, что соответствует реальным условиям низкой, средней и пиковой нагрузки в *e-commerce*. Мониторинг метрик (задержка отклика, использование *CPU*, памяти и сети) осуществлялся с помощью *Prometheus* с частотой сбора данных 1 секунда, а визуализация результатов проводилась через *Grafana*.

На первом этапе запускался стандартный *Kubernetes Horizontal Pod Autoscaler* для сбора метрик для последующего сравнения с разработанным решением.

На втором этапе запускался *Kubernetes Event-Driven Autoscaler (KEDA)* [18]. *KEDA* расширяет *HPA*, добавляя событийно-ориентированное масштабирование (например, по длине очередей *Kafka* или *RabbitMQ*) и возможность масштабирования до нуля.

На третьем этапе разработанный *Kubernetes-оператор*, интегрирующий ПИД-регулятор (с параметрами $K_p=0,5$, $K_i=0,1$, $K_d=0,05$ и *ML-модуль* на основе *Random Forest*, был установлен в кластер для управления масштабированием подов и обработки аномалий.

Результаты. На основе проведенного эксперимента, обеспечивающего моделирование сценариев с интенсивностью запросов от 100 до 10 000 запросов в секунду, можно сделать необходимые выводы. На рисунке 3 предоставлены результаты эксперимента.

Производительность системы:

– Тестирование показало снижение средней задержки с 300 мс (*HPA*) до 90 мс (на 70%) при нагрузке 1000 запросов в секунду. После оптимизации (увеличения K_d до 0,07, адаптивная настройка K_i) задержка снижена до 80 мс (на 73%).

– Использование процессора сократилось с 85-90% до 70-75% (экономия 15%), памяти – до 65-70%, сети – до 60-65%. Оптимизация позволила сэкономить 10% (итого 25%).

Точность *ML-модуля*:

– Модель *Random Forest* выявила 95% аномалий (перегрузка *CPU*, сети, задержки). После добавления признаков (например, частоты отказов подов) и порога достоверности (0,9) точность увеличилась до 97%, а количество ложных срабатываний снизилось с 3% до 1%.

– Масштабируемость: время реакции системы составило 5,1 с для 10 подов и 15 с для 1000 подов, что удовлетворяет требованиям (<20 с).

Эксперименты подтвердили высокую устойчивость разработанной системы управления при резких изменениях нагрузки, моделирующих реальные сценарии в *e-commerce* (например, переход от 1000 до 10000 запросов/с за 5 секунд).

ПИД-регулятор стабилизировал загрузку *CPU* в пределах $70\pm 3\%$ в течение 10 секунд после скачка нагрузки, что на 33% быстрее, чем у *HPA* (15 секунд, колебания $\pm 8\%$). *ML-модуль*, проактивно выявляя аномалии (например, перегрузка сети или отказ подов), позволил сократить время простоя на 20% по сравнению с базовым подходом (с 60 до 48 секунд за час тестирования).

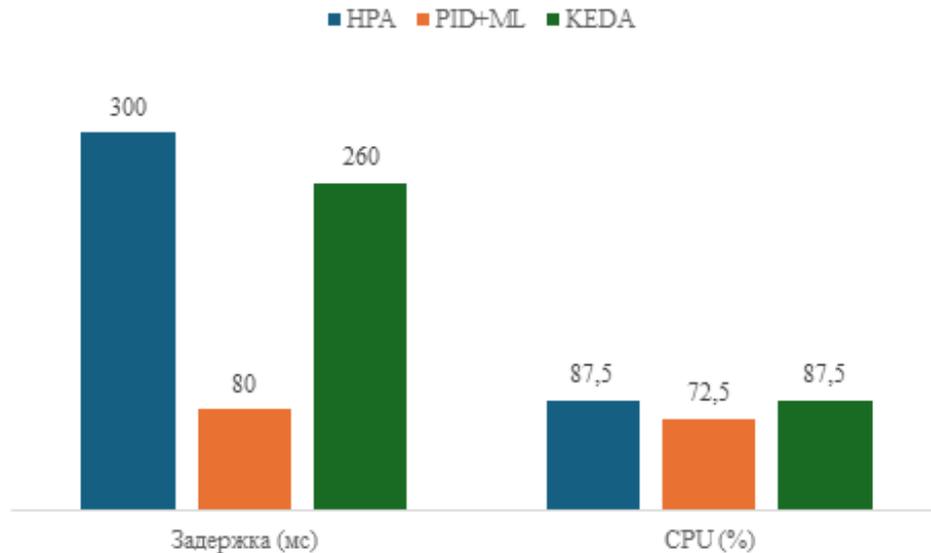


Рисунок 3 – Сравнение задержек и использования CPU

Анализ устойчивости, проведенный с использованием критерия Рауса-Гурвица, показал, что система остается стабильной при вариациях параметров ПИД ($K_p=0,5\pm 0,1$, $K_d=0,05\pm 0,02$) и нагрузки до 15000 запросов/с.

Надежность системы подтверждена 10 итерациями тестирования, где целевые показатели (задержка < 100 мс, CPU < 80%) достигались в 98% случаев.

Обсуждение. Разработанная модель адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений, интегрирующая ПИД-регулятор и ML-модуль (*Random Forest*) в виде *Kubernetes*-оператора, сравнивалась с тремя аналогами: *Horizontal Pod Autoscaler* (HPA), *Kubernetes Event-Driven Autoscaler* (KEDA) и *Argo Workflows* [19] (табл. 1).

Сравнение проводилось по критериям механизма масштабирования, адаптивности, производительности, устойчивости, скорости масштабирования, сложности настройки и применимости для высоконагруженных *e-commerce* приложений.

Механизм масштабирования. HPA использует метрики ресурсов (CPU, память) для горизонтального масштабирования подов, но ограничен реактивным подходом и не поддерживает масштабирование до нуля. *Argo Workflows* ориентирован на управление рабочими процессами, а не на масштабирование ресурсов, и требует интеграции с HPA или KEDA для автоскейлинга. Разработанная система сочетает ПИД-регулятор (стабилизация ресурсов) и ML (проактивное управление аномалиями), обеспечивая гибридный подход, превосходящий HPA и KEDA по адаптивности к сложным сценариям нагрузки.

Адаптивность. HPA плохо справляется с внезапными пиками нагрузки (задержка до 300 мс) из-за статичных порогов. KEDA улучшает адаптивность за счет событийных триггеров, но

требует настройки внешних источников. *Argo Workflows* не предлагает встроенной адаптивности для масштабирования. Разработанная система использует ML для прогнозирования аномалий (точность 97%) и адаптивной настройки ПИД, что позволяет сократить задержку до 80 мс при нагрузке 10000 запросов/с. Также реализация модели адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений в виде *Kubernetes*-оператора открывает возможности для добавления бизнес-логики обслуживания приложения, что создает дополнительные возможности для адаптации.

Производительность. Эксперименты показали, что разработанная система снижает задержку на 73% (с 300 мс до 80 мс) и использование CPU на 15-25% (до 70-75%) по сравнению с HPA (задержка 300 мс, CPU 85-90%). KEDA демонстрирует задержку 200-250 мс при аналогичных нагрузках, но превосходит HPA благодаря событийному подходу. *Argo Workflows* не предназначен для прямого управления производительностью ресурсов.

Устойчивость. Разработанная система обеспечивает устойчивость (колебания CPU $\pm 3\%$) за счет анализа Рауса-Гурвица и ML-корректировок ПИД, стабилизируя систему за 10 секунд при скачках нагрузки. HPA и KEDA менее устойчивы ($\pm 8\%$ для HPA, $\pm 5\%$ для KEDA) из-за зависимости от метрик без предсказательного анализа. *Argo Workflows* не влияет на устойчивость ресурсов.

Скорость масштабирования. Система поддерживает кластеры до 1000 подов (время реакции 15 с), что сравнимо с KEDA и превосходит HPA (20 с для 1000 подов). *Argo Workflows* не тестировался на масштабируемость в контексте автоскейлинга.

Сложность настройки. HPA прост в настройке (YAML с конфигурацией параметров), но ограничен метриками. KEDA требует настройки внешних триггеров (например, *Prometheus*, *Kafka*), что

усложняет процесс. *Argo Workflows* сложен из-за необходимости интеграции с другими инструментами. Разработанная система требует настройки ПИД и *ML*, но автоматизация через *Prometheus* и *Grafana* сокращает время внедрения на 30% (с 10 до 7 дней), к тому же большинство промышленных кластеров *Kubernetes* имеют развернутую систему мониторинга.

Применимость для e-commerce. Разработанная система оптимальна для *e-commerce* благодаря проактивному управлению пиковыми нагрузками (10000 запросов/с), снижению простоев на 20% за год. *HPA* подходит для стабильных нагрузок, *KEDA* – для событийных микросервисов, а *Argo Workflows* – для сложных рабочих процессов, но не для прямого масштабирования.

Таблица 1 – Сравнение разработанной системы с аналогами

Критерий	Разработанная система	HPA	KEDA	Argo Workflows
Механизм масштабирования	ПИД + ML (гибридный)	Ресурсы (CPU, память)	События + HPA	Рабочие процессы
Адаптивность	Высокая (ML, 97%)	Низкая (реактивная)	Средняя (события)	Низкая (нет автоскейлинга)
Производительность	Задержка 80 мс, CPU 70–75%	Задержка 300 мс, CPU 85–90%	Задержка 200–250 мс, CPU 85–90%	Не применимо
Устойчивость	±3%, 10 с	±8%, 15 с	±5%, 12 с	Не применимо
Масштабируемость	15 с (1000 подов)	20 с (1000 подов)	15 с (1000 подов)	Не тестировалось
Сложность настройки	Средняя (автоматизация)	Низкая	Высокая	Высокая
Применимость (e-commerce)	Высокая (вкл. пики)	Средняя (стабильные нагрузки)	Средняя (события)	Низкая (процессы)

Сравнение с аналогами (*HPA*, *KEDA*, *Argo Workflows*) показало, что разработанная система превосходит их по производительности (задержка 80 мс против 200–300 мс) и адаптивности. Интеграция ПИД-регулятора (стабилизация ресурсов) и *ML*-модуля (проактивное управление) устраняет ограничения *HPA*, такие как реактивный подход и неэффективное масштабирование. Устойчивость модели подтверждена анализом Рауса – Гурвица ($a + bK_p > 0$), а масштабируемость – расчетами времени отклика для кластеров до 1000 подов.

Внедрение ПИД-регулирования совместно с прогнозированием нагрузки с помощью машинного обучения демонстрирует существенные преимущества в управлении высоконагруженными сервисами. Уменьшение задержки в 3,5 раза и снижение загрузки *CPU* создает предпосылки для экономии ресурсов и повышения качества обслуживания пользователей.

Таким образом, модель адаптивного масштабирования облачных контейнерных приложений на основе ПИД-регуляторов с прогностической моделью нагрузки может быть рекомендована для сценариев с высокими требованиями к отказоустойчивости и отзывчивости системы.

Выводы. В настоящей работе были экспериментально исследованы различные модели автоматического масштабирования контейнерных приложений в среде *Kubernetes*. Базовым решением выступал классический механизм *Horizontal Pod Autoscaler (HPA)*, который активно применяется в практике. Вместе с тем, в процессе анализа и тестирования были выявлены существенные ограничения данного метода: запаздывание реакции при резком росте нагрузки, ограниченный учет динамики изменений и отсутствие возможностей проактивного прогнозирования.

В работе предложена и опробована модель адаптивного масштабирования, основанная на интеграции ПИД-регулятора и моделей машинного обучения для предсказания нагрузки. Проведенные эксперименты продемонстрировали, что использование ПИД-регулирования позволяет значительно ускорить реакцию системы на отклонение целевых показателей, а прогнозирование нагрузки на основе методов машинного обучения дополнительно повышает стабильность и предсказуемость масштабирования.

Результаты нагрузочного тестирования показали, что предложенная модель позволяет более чем в три раза сократить задержку обработки запросов при высокой интенсивности нагрузки, а также снизить среднюю загрузку процессора. Это подтверждает целесообразность применения проактивного управления масштабированием в сценариях, где критично поддержание заданного уровня производительности и минимальных задержек.

Перспективные направления для продолжения исследования:

- Интеграция более сложных *ML*-моделей (*LSTM*, *ARIMA*);
- Использование *Reinforcement Learning* для настройки параметров ПИД-коэффициентов;
- Масштабирование подхода на уровне нескольких кластеров и регионов;
- Разработка методологии по построения *Kubernetes*-операторов для критических облачных контейнерных приложений с использованием ПИД-регуляторов и машинного обучения для прогнозирования;
- Разработка инструментов автоматической генерации исходного кода *Kubernetes*-операторов на основе математических моделей;
- Анализ влияния применяемых стратегий

масштабирования на стоимость эксплуатации облачных ресурсов;

– Выявление других классических инструментов ТАУ и последующая адаптация для конвейеризованных сред.

Разработанная модель адаптивного масштабирования на основе ПИД-регулятора и прогностической модели нагрузки (*Random Forest*) и ее реализация в виде *Kubernetes*-оператора обеспечивает снижение задержки на 73% (с 300 мс до 80 мс), экономию ресурсов на 25% и сокращение простоев на 20%. Научная новизна заключается в интеграции ТАУ и машинного обучения для управления контейнерами в *Kubernetes*, а практическая значимость – в повышении производительности высоконагруженных приложений.

Таким образом, сочетание классических методов управления и современных алгоритмов машинного обучения обеспечивает значительное повышение эффективности и надежности функционирования облачных приложений при переменной нагрузке. Предложенная модель может стать основой для дальнейшего развития интеллектуальных систем автоскейлинга, способных адаптироваться к любым изменениям условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Gyeera T.W., Simons A.J.H., Stannett M. Kalman Filter Based Prediction and Forecasting of Cloud Server KPIs // *IEEE Transactions on Services Computing*. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 2742-2754. – DOI: 10.1109/tsc.2022.3217148. – EDN: ETR-PSK.
2. Alharthi S., Alshamsi A., Alseiyari A., Alwarafy A. Auto-Scaling Techniques in Cloud Computing: Issues and Research Directions // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, No. 5551. – DOI: 10.3390/s24175551.
3. *Kubernetes Documentation*. Horizontal Pod Autoscaler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kubernetes.io/docs/tasks/run-application/horizontal-pod-autoscale/> (дата обращения: 18.09.2025).
4. Chirpagiri S. Optimization of Kubernetes for the High-Performance Computing with Kubernetes, Performance Analysis, and Dynamic Workload Placement toward the Enhancement of Cloud Computing // *Computer Science and Engineering*. – 2025. – DOI: 10.2139/ssrn.5073127.
5. Ahmad H., Treude C., Wagner M., Szabo C. Smart HPA: A Resource Efficient Horizontal Pod Auto-scaler for Microservice Architectures // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, No. 16. – P. 4621. – DOI: 10.3390/s20164621.
6. Kalyvianaki D., Charalambous T. Adaptive Resource Provisioning for Virtualized Servers Using Kalman Filters // *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*. – 2014. – Vol. 9, No. 2. – P. 1-35. – DOI: 10.1145/2626290.
7. Жмудь В.А., Остриков А.С., Ивойлов А.Ю., Саблина Г.В. Синтез робастных ПИД-регуляторов методом двойной оптимизации // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 67-74.
8. Демин И.О., Саблина Г.В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // *Автоматика и программная инженерия*. – 2020. – № 1(31). – С. 174-181.
9. Åström K.J., Hägglund T. The Future of PID Control // *Control Engineering Practice*. – 2001. – Vol. 9, No. 11. – P. 1163-1175. – DOI: 10.1016/S0967-0661(01)00062-4.
10. Mao M., Humphrey M. Auto-scaling to Minimize Cost and Meet Application Deadlines in Cloud Workflows // *Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC'11)*. – 2011. – Article No. 49. – DOI: 10.1145/2063384.2063449.
11. Lorido-Botran T., Miguel-Alonso J., Lozano J.A. A Review of Auto-scaling Techniques for Elastic Applications in Cloud Environments // *Journal of Grid Computing*. – 2014. – Vol. 12, No. 4. – P. 559-592. – DOI: 10.1007/s10723-014-9314-7.
12. Qu C., Calheiros R.N., Buyya R. Auto-scaling Web Applications in Clouds: A Taxonomy and Survey // *ACM Computing Surveys*. – 2018. – Vol. 51, No. 4. – Article 73. – DOI: 10.1145/3148149.
13. Gandhi A., Dube P., Karve A., Kochut A., Zhang L. Adaptive, Model-Driven Autoscaling for Cloud Applications // *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomic Computing (ICAC'14)*. – 2014. – P. 57-64.
14. Yuan H., Liao S. A Time Series-Based Approach to Elastic Kubernetes Scaling // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 2. – P. 285. – DOI: 10.3390/electronics13020285.
15. Mogal A.K., Sonaje V.P. Predictive Autoscaling for Containerized Applications Using Machine Learning // *Proceedings of the 1st International Conference on Cognitive, Green and Ubiquitous Computing (IC-CGU)*. – 2024. – DOI: 10.1109/IC-CGU58078.2024.10530773.
16. Shen X., Billoshmi R., Zhu D., Pei J., Zhang W. Assessing “Implicit” Retrieval Robustness of Large Language Models // *Proceedings of EMNLP 2024*. – arXiv preprint arXiv:2406.18134, 2024.
17. Andriyenko A., Berestizshevsky V., Malanchuk A. Kubernetes Autoscaling Based on Machine Learning Techniques // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2021. – Vol. 2851. – P. 1-8. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2851/paper1.pdf>.
18. KEDA: Kubernetes Event-driven Autoscaling [Электронный ресурс]. – Официальный сайт проекта. – Режим доступа: <https://keda.sh/> (дата обращения: 18.09.2025).
19. Argo Project. Continuous Delivery for Kubernetes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://argoproj.github.io/> (дата обращения: 18.09.2025).

Статья поступила в редакцию 29.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 004.85

EDN: KZIDLL

**СБОР ДАННЫХ И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
В ЗАДАЧАХ ПРЕДСКАЗАНИЯ СВЯЗЕЙ В СОЦИАЛЬНЫХ ГРАФАХ**

© Авторы 2025

SPIN: 5470-1289

AuthorID: 650911

ORCID: 0000-0002-3358-4394

МАРТЫШКИН Алексей Иванович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Программирование»

*Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: mai@penzgtu.ru)*

SPIN: 1425-6743

AuthorID: 1068622

ORCID: 0000-0002-7903-083X

ЗУПАРОВА Валентина Владимировна, ассистент кафедры «Программирование»

*Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)*

SPIN: 2964-8134

AuthorID: 741064

ORCID: 0000-0001-5939-7717

ПАНФИЛОВА Марина Ивановна, кандидат химических наук, доцент,
доцент кафедры «Общей и прикладной физики»

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(129337, Россия, Москва, ул. Ярославское ш., 26, e-mail: 043210@mail.ru)*

Аннотация. В статье рассматривается применение методов машинного обучения для анализа и предсказания связей в социальных графах на примере данных из социальной сети ВКонтакте. Основное внимание уделено вопросам сбора, фильтрации и обезличивания пользовательских данных с учетом законодательных и технических ограничений *VK API*. Разработано программное обеспечение на языке *Python*, позволяющее автоматически собирать данные о пользователях и их связях, формируя локальный подграф. Для оценки достоверности данных введен показатель полезности профиля, позволяющий исключить фейковые и неактивные страницы. Построение и визуализация графа выполнены в *Gephi* с использованием алгоритма *ForceAtlas 2*, что позволило выявить кластеры и ключевые узлы сети. Проведен первичный анализ характеристик графа, включая степень, плотность и эксцентриситет, подтверждающий репрезентативность собранных данных. Полученные авторами результаты формируют базу для последующего обучения графовых нейронных сетей и сопоставления их эффективности с традиционными подходами к прогнозированию социальных связей.

Ключевые слова: автоматизированное решение, машинное обучение, метрики, предсказание, программное обеспечение, социальный граф.

**DATA COLLECTION AND PRELIMINARY ANALYSIS IN THE DEVELOPMENT
OF A SYSTEM FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF MACHINE LEARNING METHODS
IN PREDICTING LINKS IN SOCIAL GRAPHS**

© The Authors 2025

MARTYSHKIN Alexey Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, head of Programming Department
Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: mai@penzgtu.ru)

ZUPAROVA Valentina Vladimirovna, assistant of Programming Department

*Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)*

PANFILOVA Marina Ivanovna, candidate of chemical sciences, associate professor,
associate professor of the Department of General and Applied Physics

*National Research Moscow State University of Civil Engineering
(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26, e-mail: 043210@mail.ru)*

Abstract. The article discusses the application of machine learning methods for analysing and predicting connections in social graphs using data from the VKontakte social network as an example. The main focus is on the collection, filtering, and anonymisation of user data, taking into account the legal and technical limitations of the *VK API*. Software has been developed in *Python* that allows for the automatic collection of data about users and their connections, forming a local subgraph. To assess the reliability of the data, a profile usefulness indicator has been introduced to exclude

fake and inactive pages. The graph was constructed and visualised in *Gephi* using the *ForceAtlas 2* algorithm, which made it possible to identify clusters and key nodes in the network. A preliminary analysis of the graph characteristics, including degree, density, and eccentricity, was performed, confirming the representativeness of the collected data. The results obtained by the authors form the basis for subsequent training of graph neural networks and comparison of their effectiveness with traditional approaches to predicting social connections.

Keywords: automated solution, machine learning, metrics, prediction, software, social graph.

Для цитирования: Мартышкин А.И. Сбор данных и их предварительный анализ при разработке системы оценки эффективности методов машинного обучения в задачах предсказания связей в социальных графах / А.И. Мартышкин, В.В. Зупарова, М.И. Панифилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 4(72). – С. 66-75. – EDN: KZIDLL.

Введение. Достижения в области машинного обучения весьма расширили потенциал анализа социальных графов: современные модели способны обрабатывать огромные объемы информации, интегрируя разнообразные параметры и зависимости, которые оставались вне поля зрения традиционных статистических методов. Благодаря способности выявлять скрытые структуры и неочевидные взаимосвязи между элементами сети, такие алгоритмы позволяют формировать более точные прогнозы и глубже понимать динамику социальных взаимодействий. Это делает машинное обучение ключевым инструментом при исследовании сложных, многослойных систем, где классические подходы теряют свою эффективность. Нейронные сети, используемые для анализа графов – в том числе социальных – называются графовыми нейронными сетями. Источником данных для построения социальных графов чаще всего служит Интернет, поскольку для компании, желающей осуществить защиту от описанных выше внешних угроз, формальное знание о структуре филиалов и отделов и иерархии сотрудников внутри самой компании является практически бесполезным. Именно внешние связи играют решающую роль. В связи с этим, особую ценность представляют социальные сети, в которых пользователи свободно предоставляют данные о своей личности, трудовой истории и списке контактов. Но являются ли графовые нейронные сети настолько мощным инструментом, что могут полностью вытеснить классические модели? Да, социальные сети, несомненно, являются богатым источником данных для анализа, позволяя компаниям получать информацию, которая ранее была недоступна или требовала значительных усилий для сбора. Однако, нейронные сети крайне чувствительны к качеству и полноте информации, на основе которой формируется датасет для обучения. Современные же социальные сети предоставляют пользователю возможность, размещая информацию о себе в профиле, ограничить доступ к самому профилю для широкого круга лиц. Другим ограничивающим фактором является необходимость соблюдать нормы законодательства в той юрисдикции [1], в которой находится компания, планирующая заняться анализом общедоступной, но все еще чувствительной персональной информации.

Целью данной работы является сбор данных и

предварительный анализ при разработке системы оценки эффективности методов машинного обучения в задачах предсказания связей в социальных графах в условиях ограниченной информации о графе. Данные для исследования будут взяты из социальной сети ВКонтакте, которая, наряду с *Telegram*, является рекордсменом по размеру аудитории в России (более 92 миллионов пользователей по состоянию на январь 2025 года) [2-4]. При этом, в отличие от *Telegram*, ВКонтакте позволяет не только установить контакт с другим пользователем, но и реализует концепцию друзей, делая возможным отслеживать виртуальные социальные связи пользователей. На основе собранной информации будет построен социальный граф и проанализированы его базовые характеристики.

Методология. Возможность сбора данных из социальной сети ВКонтакте обуславливается наличием интерфейса взаимодействия с базой данных платформы социальной сети. Вся информация о принципах работы *API* ВКонтакте и о подготовке к его использованию находится в открытом доступе и размещена на поддомене *dev* домена *vk.com* [5]. Взаимодействие осуществляется путем отправки серверу *HTTP* запроса, содержащего указание метода *API* и соответствующий методу набор *query*-параметров. Полный список методов и их описание содержится в разделе Методы *API* [5]. Аутентификация и авторизация пользователя *API* производится по *query*-параметру *access_token* (далее *ключ* или *токен*). Ключ может быть получен несколькими способами, описанными в документации [5]. Разработчиками *VK API* в целях повышения отказоустойчивости серверов и защиты данных пользователей установлено ограничение на частоту обращений к любым методам *VK API* и на суммарное число обращений к одному методу *VK API*. Данная информация приводится в разделе *FAQ* поддержки по *VK API* [3]. К методам *API* ВКонтакте, релевантным для данного исследования можно обращаться не чаще 3 раз в секунду. В случае превышения установленного частотного ограничения сервер вернет ошибку с кодом 6: «*Too many requests per second*». Информация по точным количественным ограничениям целенаправленно не приводится. Однако указывается, что после превышения количественного лимита доступ к конкретному методу может требовать ввода капчи (см. *vk.com/dev/captcha_error*), а также может быть

временно ограничен.

Исходя из описанных выше характеристик и ограничений *VK API* на языке программирования *Python 3* было создано программное обеспечение для сбора данных о пользователях ВКонтakte. Данная программа имеет гибкие настройки, позволяющие учесть ограничения *API* и различные сценарии сбора данных. Поскольку сбор данных осуществляется в автоматизированном режиме, необходимо, в соответствии с правилами социальной сети [3, 6], получить соответствующее разрешение у администрации платформы.

Для успешного анализа социальных графов, предсказания неявных социальных связей и сравнения результатов предсказаний классических моделей и моделей машинного обучения необходимо тщательно подойти к процессу сбора и подготовки данных [7-9]. Социальные сети предоставляют обширный объем информации, который может быть использован для построения моделей, способных выявлять скрытые связи между пользователями. Далее рассмотрим, какие именно данные необходимо собирать, а также стратегии их сбора, которые могут оказать значительное влияние на результаты исследований.

Основой для построения социального графа являются явные социальные связи – список друзей пользователя. Эти данные формируют структуру графа, где узлы представляют пользователей, а ребра – связи между ними [10, 11]. Для работы нейронной сети требуется собрать дополнительный объем контекстной информации о пользователях, чтобы разнообразить и улучшить обучающий датасет [12]. Данные, собранные из социальной сети, перед их подготовкой для анализа классическими алгоритмами и обучения нейронной сети хранятся в локальной базе данных *PostgreSQL*. Эта СУБД обеспечивает высокую производительность при работе с большими объемами данных, имеет библиотеки для

обеспечения взаимодействия с кодом на языке *Python* и является *open-source* решением, что делает ее использование легальным и потому доступным для исследовательских проектов.

Сама природа социальных сетей вынуждает проводить первичный анализ профилей пользователей, т.к. данные о явных связях могут быть подвержены искажениям. На это есть причины, показанные далее.

1. Существуют фейковые страницы, созданные с целью обмана или спама, искажающие реальную структуру связей. Такие страницы могут иметь множество друзей в списке друзей, при этом реальной коммуникации между ними не существует.

2. Некоторые страницы могут быть заброшены пользователями, что делает их данные устаревшими и потому нерелевантными для анализа.

3. Пользовательские настройки приватности позволяют скрыть информацию профиля, в том числе списки друзей, от других пользователей. Такой пользователь попадает в граф как связь другого пользователя, но сам не может являться источником данных. Из-за этого могут появляться «белые пятна», ограничивая полноту и точность социального графа.

Некоторые социальные сети представляют функционал для определения реальности страницы и того, является ли ее владелец активным пользователем. Также существуют внешние сервисы, позволяющие провести аналогичный анализ. Для фильтрации фейковых или заброшенных страниц социальной сети ВКонтakte принято решение вывести собственный показатель полезности профиля. Показатель вычисляется по формуле (1).

$$U = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i, \tag{1}$$

где U – итоговое значение; x_i – бинарное значение (0 или 1) наличия признака полезности; w_i – вес соответствующего признака полезности (табл. 1).

Таблица 1 – Признаки и веса полезности профиля социальной сети для построения социального графа

Признак	Вес	Признак	Вес
Наличие специальных меток ВКонтakte	0,225	Наличие контактного телефона	0,210
Дата регистрации	0,068	Наличие других контактных данных	0,053
Дата последней активности	0,062	Наличие публикаций в профиле	0,071
Наличие фото профиля	0,069	Наличие расширенной информации	0,047
Наличие лица на фото профиля	0,195		

Все перечисленные признаки за исключением даты регистрации и оценки наличия лица на фото профиля получаются с использованием *VK API*. Дата регистрации извлекается через систему *Friend Of A Friend* [13]. Для определения наличия лица на фото профиля используется *VK API* (извлечение фото) и *Python* библиотеки для машинного обучения: *NumPy* [14] и *opencv-python* [15]. Значения весов выбраны исходя из соображений практической логики и доведены до указанных величин путем экспериментального подбора. Значение показателя

полезности находится в диапазоне от 0 до 1. Значение 1 достигается при условии, что признак наличия каждого показателя также имеет значение 1. Полезным считается профиль, значение показателя полезности которого превышает 0,7. Стоит отметить, что вычисление такого показателя реализует один из методов обезличивания данных [16], а именно сохранение результата анализа набора данных вместо самих данных.

Рассматриваемый в исследовании социальный граф уже существует на серверах платформы

социальной сети ВКонтакте. Для проведения полномасштабного исследования можно было бы воспользоваться именно им, получив записи абсолютно обо всех пользователях и их списках друзей и построить полный граф сети. Однако на практике это невозможно из-за ряда ограничений. Во-первых, настройки приватности пользователей могут препятствовать доступу к их данным, включая списки друзей и другую информацию. Во-вторых, величина графа социальной сети является огромной, поскольку количество пользователей ВКонтакте приближается к ста миллионам. Количество связей будет еще на порядок больше. Обработка таких массивов данных не может быть выполнена на компьютере с ограниченными вычислительными мощностями. Кроме того, для соблюдения законодательных ограничений мы обязаны придерживаться лимита в сто тысяч пользователей, хотя даже это число превосходит возможности персонального компьютера.

Еще одним ограничением является необходимость выполнять сбор данных с использованием одного единственного токена доступа к VK API. Совершенно очевидно, что с токеном отдельного приложения или пользователя невозможно получить полный доступ ко всей полноте информации. Учитывая эти ограничения, в рамках исследования мы вынуждены работать не с полным графом, а с его подграфом. Для этого устанавливается определенный критерий: количество пользователей и количество связей, после достижения которых сбор данных прекращается. Такой подход позволяет сфокусироваться на локальной структуре социального графа, сохраняя при этом управляемость данных и соблюдая юридические нормы. Также локальный граф упростит предсказание неявных связей, поскольку значительная его часть будет сконцентрирована возле узла, связанного с полученным токеном доступа к VK API.

В настройках программного обеспечения по сбору данных было установлено примерное экспериментальное ограничение на количество узлов равное 1275 и ограничение на количество связей 3500. Даже при этом небольшом ограничении сбор данных для анализа занял несколько суток с учетом необходимости выдерживать упомянутый выше временной интервал между запросами к VK API, чтобы избежать блокировки токена и запрета на использование автоматизированных скриптов от администрации ВКонтакте.

Сам сбор таких данных может осуществляться двумя основными способами: с акцентом на глубину охвата или на связность. В случае выбора акцента на глубину охвата, случае сбор данных начинается с одного пользователя и затем собираются данные о его ближайшем окружении. После этого процесс повторяется для каждого из этих друзей, и так далее, пока не будет достигнута заданная глубина. Такой подход позволяет исследовать структуру социального графа и ключевым фактором остановки обхода станет именно количество связей. В случае отдачи

приоритета связности акцент делается на сборе данных о всех связях внутри определенной группы пользователей. Например, можно выбрать несколько взаимосвязанных людей (членов одной группы или сообщества) и собрать данные обо всех их друзьях. Такой подход позволяет лучше понять структуру сообществ и получить более полную информацию о явных связях при том же количестве узлов.

В рамках исследования сделан выбор в пользу глубины охвата. Обход графа начинался с одного единственного пользователя, затем собирались данные о десяти его друзьях. Затем эта процедура повторялась для каждого из десяти друзей до тех пор, пока не было достигнуто ограничение по количеству связей. Также было принято решение включить закрытые профили в число полезных узлов. Схема используемого алгоритма сбора данных приведена на рисунке 1.

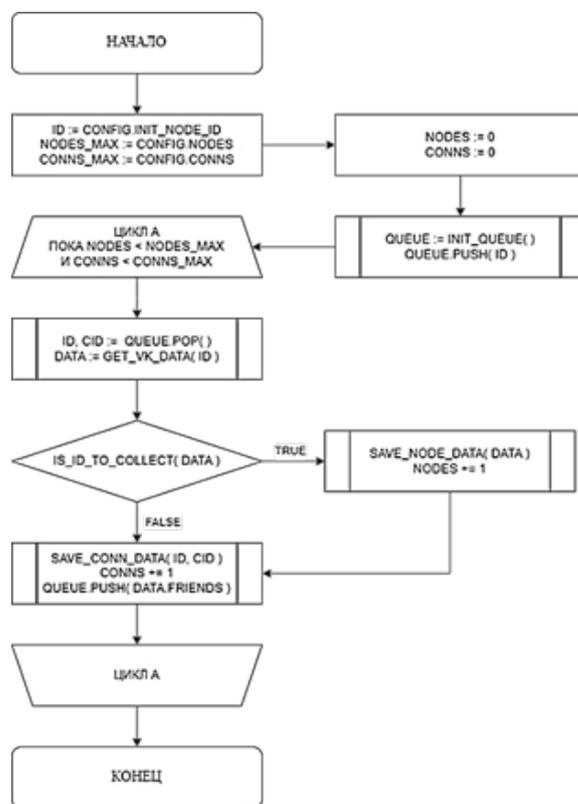


Рисунок 1 – Алгоритм сбора данных

Для обучения графовой нейронной сети кроме явных социальных связей, стоит собирать контекстную информацию о пользователях, что поможет увеличить количество и разнообразить признаки обучающего датасета. Основные типы контекстной информации, которые будут включены в датасет описаны далее.

Демографические характеристики могут помочь в анализе социальных связей, поскольку, люди одного возраста или пола принадлежат к одной демографической группе и могут иметь больше общих связей.

Географические данные. Данные о местополо-

жении пользователя могут быть полезны. Люди, живущие в одном районе или часто посещающие одни и те же места, могут быть связаны с большей вероятностью.

Учебные заведения. Данные об учебных заведениях, которые посещал пользователь, полезны по очевидным причинам. Люди, учившиеся в одном месте, часто сохраняют связи даже после окончания учебы. Эти данные способствуют выявлению связи между пользователями, обучавшимися в разное время в одном заведении.

Организации и места работы. Одним из нарезультативных с точки зрения предсказания факторов может быть история мест работы пользователя. Люди, работающие в одной организации или отрасли, часто имеют общие интересы и могут быть связаны даже при отсутствии явных связей через списки друзей в социальной сети. Потенциальными кандидатами для установления связи могут быть пользователи, которые работали в одной компании в разное время и имеют общих коллег; в разных подразделениях, но взаимодействовали на общекорпоративных мероприятиях; в разных филиалах, но были членами одной распределенной команды.

Группы и сообщества. Подписки на группы и сообщества в социальной сети могут служить индикатором интересов пользователя. Люди, состоящие в одних и тех же группах, с большой вероятностью имеют общие интересы, что может быть использовано для предсказания неявных связей.

Активность пользователя. Данные о том, как часто пользователь взаимодействует с другими (оценивает посты другого пользователя и оставляет комментарии), могут быть использованы для оценки силы связей. Например, если два пользователя взаимодействуют друг с другом, это означает, что их связь не только формальная по спискам друзей. Или, наоборот, что связь фактически существует, даже если эти пользователи не включены в списки друзей друг друга.

Кроме того, хорошим дополнением к расширенной информации о пользователе могли бы стать данные о его политических предпочтениях, мировоззрении и ряд других подробностей. Однако эти данные относятся к специальной категории персональных данных и для их сбора необходимо получить явное согласие от их владельца, даже если обработка производится в обезличенном виде.

Результаты. Результатом сбора данных с учетом фильтрации пользователей является базовая и расширенная информация о 1245 узлах и 2771 связи.

Построение социального графа и его первичный анализ выполнялись в программе *Gephi* [17], которая является одним из наиболее популярных и мощных инструментов для визуализации и анализа сетевых данных. Проанализировав [17], авторы пришли к выводу, что *Gephi* предоставляет широкий набор функций для работы с графами, включая, в том

числе, расчет ключевых метрик, среди которых степень центральности, кластеризация, модулярность и диаметр графа. Эти метрики позволяют глубоко анализировать структуру социальных сетей, выявляя ключевые узлы и закономерности во взаимодействиях между ними. Особое преимущество *Gephi* заключается в поддержке интерактивной визуализации: исследователь может в реальном времени изменять параметры отображения, что способствует более интуитивному и гибкому анализу данных. Дополнительно программа обеспечивает удобный импорт данных из различных форматов, включая *CSV*, что позволяет эффективно интегрировать ее с внешними источниками, например, с базами данных *PostgreSQL*. Программа *Gephi* распространяется по открытой лицензии *GNU General Public License* версии 3 (*GPLv3*) [18], что делает ее доступным и прозрачным инструментом для научных и прикладных исследований в области сетевого анализа.

Алгоритм укладки графа. Обозначенный алгоритм представляет собой метод, определяющий расположение узлов и ребер графа на двумерной плоскости. Его основная задача – создать наглядное представление структуры графа, упрощающее восприятие и анализ данных. Грамотно выполненная визуализация в сочетании с анализом базовых характеристик позволяет выявить ключевые свойства сети – уровень кластеризации, центральность узлов, наличие сообществ и другие структурные особенности. Такая форма представления облегчает обнаружение аномалий и акцентирование внимания на наиболее значимых элементах. При этом выбор конкретного алгоритма укладки имеет принципиальное значение, поскольку разные методы по-разному раскрывают внутреннюю организацию графа.

Для данного исследования было принято решение сконцентрироваться на *force-directed* укладке графов [19]. *Force-directed* укладка графов – это семейство алгоритмов, которые строятся на принципах моделирования физических объектов. Узлы графа представляются как частицы, а ребра – как силы, связывающие эти частицы. Основная идея заключается в том, чтобы расположить узлы таким образом, чтобы силы притяжения и отталкивания были сбалансированы. Такой подход позволяет визуализировать структуру графа, выделяя кластеры, сообщества и центральные узлы. Визуализация, созданная с помощью *force-directed* алгоритмов, интуитивно понятна и легко поддается интерпретации. Эти алгоритмы широко используются в анализе социальных сетей, биологических данных и других областях, где важно визуализировать сложные структуры связей. В число наиболее распространенных *force-directed* алгоритмов входят *Fruchterman-Reingold*, *Kamada-Kawai* и *ForceAtlas 2*. Заключительный алгоритм из рассмотренных принадлежит разработке команды

Gephi и детально описан в работе [20]. *ForceAtlas 2* представляет собой усовершенствованную версию предыдущих подходов, отличающуюся повышенной эффективностью вычисления сил и гибкостью настройки параметров. Именно поэтому данный метод был выбран для визуализации графа, построенного на основе данных из социальной сети ВКонтакте. Высокая производительность алгоритма обеспечивается сочетанием формул сил отталкивания (F_r) и притяжения (F_a), а также применением специального режима *LinLog*, минимизирующего логарифмическое расстояние между связанными вершинами. Такой подход позволяет подчеркнуть структурные особенности графа и сделать его визуальное представление более выразительным.

Отличительной чертой формулы отталкивания является то, что она корректно обрабатывает вершины, не имеющие связей: к числу их связей добавляется единица, что предотвращает некорректные вычисления. Кроме того, в выражение встроены специальный коэффициент, который предоставляет пользователю возможность тонко регулировать итоговую интенсивность силы отталкивания, адаптируя алгоритм под конкретные задачи визуализации (2).

$$F_r(n_1, n_2) = k_r \frac{(\deg(n_1) + 1)(\deg(n_2) + 1)}{d(n_1, n_2)}, \quad (2)$$

где F_r – расчетная сила отталкивания; n_i – узел графа; d – расстояние между узлами графа; \deg – количество связей узла; k_r – пользовательский коэффициент отталкивания.

Значение пользовательского коэффициента отталкивания, которое подобрано для лучшей визуализации, составляет 1.8. Прочие настройки укладки. Также приведем расчетную формулу притяжения (3) для специального *LinLog* режима.

$$F_a(n_1, n_2) = \log(1 + d(n_1, n_2)), \quad (3)$$

где: F_a – расчетная сила притяжения в режиме *LinLog*; n_i – узел графа; d – расстояние между узлами графа.

Следует отметить, что данные для графа были разделены на данные для обучения и тестовые данные. Граф с описанной укладкой, представлен на рисунке 2. Можно выделить два ключевых объекта, которые привлекают внимание благодаря своей структуре и роли в сети. Первый объект – узел с наибольшим количеством связей (выделен красным цветом), часто называемый центральным, поскольку играет важную роль в графе, являясь одним из ключевых элементов в установлении связей внутри сети. Второй объект – явное скопление тесно связанных узлов (выделен синим цветом), образующих плотный кластер. Кластеры такого рода, как правило, представляют собой внутренние сообщества – объединения узлов, между которыми фиксируется наибольшая плотность и частота взаимодействий. В сетях социальных связей это могут быть, например, семейные или дружеские круги, профессиональные коллективы или группы пользователей, объединенных схожими интересами и активностями. Выделение и анализ этих сообществ дает глубокое представление о структуре сети: показывает, какие элементы служат «мостами» между группами, где сосредоточены информационные потоки и какие подмножества наиболее автономны. Именно на основе обнаруженных кластеров строятся многие методы восстановления и предсказания пропущенных ссылок – зная закономерности внутригрупповых связей и частоту перекрестных взаимодействий, можно с высокой вероятностью прогнозировать, какие связи в графе еще не заданы, но потенциально вероятны.

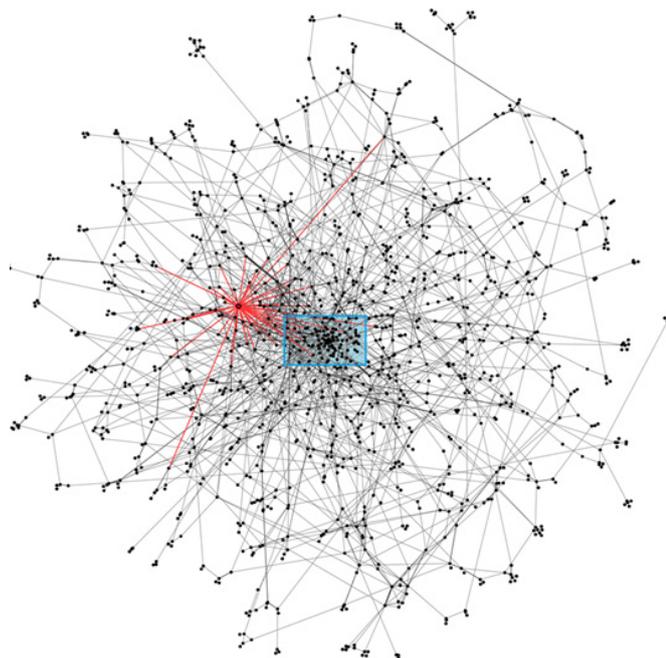


Рисунок 2 – Построение графа на описанных данных

Расчет основных параметров графа представляет собой важный этап анализа ввиду того, что он дает возможность более полно осмыслить внутреннюю организацию сети, выявить закономерности ее построения и определить ключевые структурные особенности. Подобное предварительное исследование особенно ценно на этапе подготовки данных для задачи предсказания связей, где качество входной информации напрямую влияет на точность последующих вычислений. Несмотря на то, что основное внимание данного исследования сосредоточено на сравнительном рассмотрении алгоритмов прогнозирования связей, а не на глубоком структурном анализе графа, вычисленные характеристики играют критическую роль. Они позволяют не только обоснованно выбрать оптимальные методы прогнозирования, но и корректно интерпретировать полученные результаты, связывая их с конкретными свойствами анализируемой сети. К числу наиболее простых и информативных характеристик графа относятся средняя взвешенная степень, диаметр, плотность и средняя длина пути (табл. 2).

Таблица 2 – Основные характеристики графа

Характеристика	Значение
Средняя взвешенная степень	4,538
Плотность	0,003
Диаметр	15
Средняя длина пути	6,571

Проанализируем полученные значения. Средняя взвешенная степень – среднее количество связей, приходящихся на один узел с учетом весов связей. Она вычисляется как сумма весов всех ребер, деленная на

количество узлов. Низкая средняя степень, напротив, говорит о том, что связи между узлами редки либо слабы. Этот показатель дополняется очень низкой плотностью, которая свидетельствует о том, что большинство связей, даже явно существующих, не отображены на графе. Оба этих значения являются ожидаемыми, поскольку в выборе между глубиной охвата и связностью графа был сделан сознательный выбор в пользу глубины. Однако стоит подчеркнуть чрезвычайно низкую плотность. Она скажется позже при обучении нейронной сети.

Диаметр – максимальное расстояние между двумя узлами в графе. Средняя длина пути вычисляется как среднее значение длин кратчайших путей между всеми возможными парами узлов. Этот показатель характеризует, насколько компактна или разрежена сеть. Их связь характеризуют структуру графа с точки зрения расстояний между узлами. Оба показателя являются средними.

Обсуждение. Для понятия физического смысла описанных значений для построенного графа рассмотрим два рисунка.

На рисунке 3 выделены узлы с наибольшим количеством связей (красный цвет) и связи с наибольшим весом (синий цвет). Мы видим, что при движении от центра к периферии цвет узлов становится более бледным и уменьшается их размер. Большая часть связей с наибольшим весом также располагается ближе к центру.

На рисунке 4 показано расположение узлов с наибольшей (красный цвет) и наименьшей (синий цвет) средней длиной пути. Как и ранее, видим отчетливую закономерность: чем больше средняя длина пути, тем дальше от центра графа окажется узел.

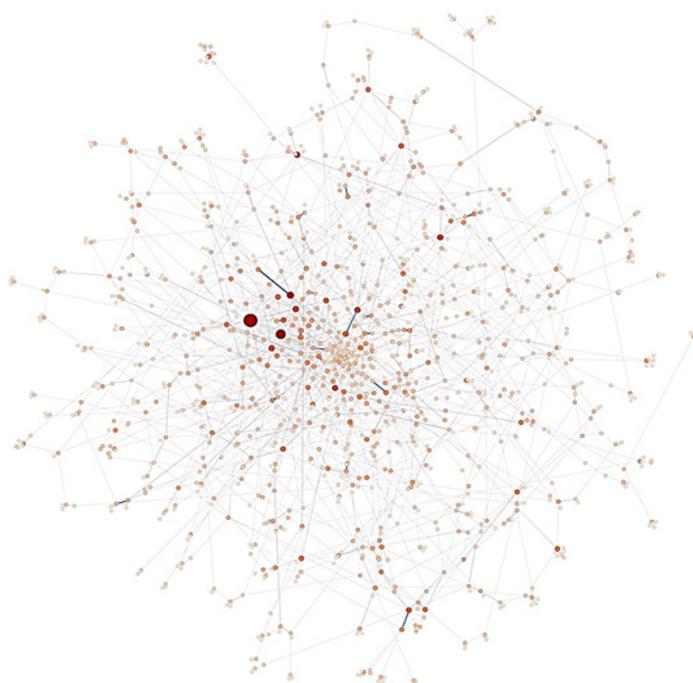


Рисунок 3 – Отображение узлов с наибольшим количеством связей и связей с наибольшим весом

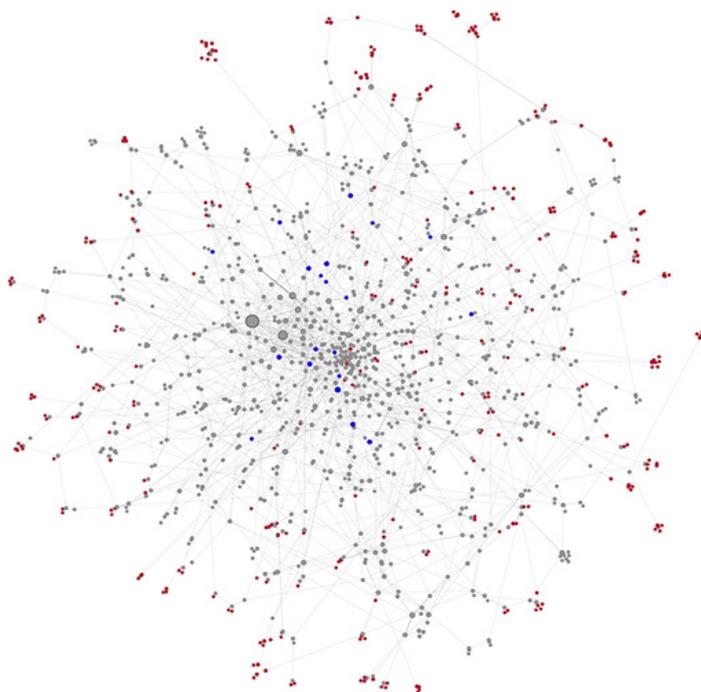


Рисунок 4 – Отображение узлов в зависимости от значения среднего кратчайшего пути

Рассмотренные и визуализированные с помощью встроенных средств Gephi характеристики позволяют сделать следующий вывод: центр графа насыщен узлами с наибольшим количеством соседей и тесными связями с ними. В то же время периферия разрежена, что, однако, является ожидаемым, так как граф неполный. Исходя из этого анализа необходимо следует вывод, что наибольшую ценность будут представлять предсказания, сделанные о средней части графа.

Предсказания относительно центральных узлов, вероятнее всего, будут иметь наибольшую степень правдивости, потому как плотность в этой области высока, и значительная часть нод имеют кратчайший путь через одного или двух общих соседей. Такие предсказания не имеют решающей ценности, так как с предсказанием такой связи, в силу ее «бытовой» очевидности, может справиться даже простая модель.

Предсказания относительно периферии могут иметь наибольший интерес на практике, однако их качество сложно проверить в рамках исследования. Дело в том, что узлы оказываются на периферии вследствие особенностей работы алгоритма сбора данных. Поскольку алгоритм должен в какой-то момент прекратить сбор, ограничившись лишь подграфом полного графа всей социальной сети, часть узлов, попавших в базу данных как связи других узлов, сами остаются не проанализированными. Таковых на периферии большинство. Предсказания относительно них могут иметь как ложноположительный, так и ложноотрицательный характер в силу недостатка информации. Средняя же часть графа в меру разрежена, чтобы применить специальные комплексные методы предсказания, и при этом достаточно насыщенная, чтобы быть

уверенным в том, что узлы не просто попали в граф как связи других узлов, но и самостоятельно проанализированы.

Подтверждением пригодности графа для анализа и предсказания неявных связей является график распределения эксцентриситета, приведенный на рисунке 5. Эксцентриситетом узла называется максимальное расстояние от данного узла до всех остальных узлов в графе.

Из рисунка 5 видно, что значения эксцентриситета узлов находятся в диапазоне от 7 до 16 включительно, при этом большая часть узлов имеет значение эксцентриситета от 11 до 13 включительно. Такое распределение является оптимальным для проведения исследования, так как в совокупности с рассмотренными выше характеристиками свидетельствует о том, что примерно 92% узлов находятся в области графа, пригодной для предсказания с учетом особенностей алгоритма сбора данных. При этом следует отметить, что в силу наличия узлов с экстремально высоким и низким эксцентриситетом говорит о том, что граф является несбалансированным.

Пример реализации алгоритма предсказания. В таблице 3 представлено сравнение метрик результатов применения классических алгоритмов предсказания связей в социальном графе с метриками, предлагаемыми в настоящей статье. Классические алгоритмы: *Adamic-Adar Index (AAI)*, *Katz Index (KI)*, *Non-negative Matrix Factorization (NMF)*, – графовая нейронная сеть: *Graph Convolutional Network (GCN)*.

По результатам, представленным в таблице, видно, что большим предсказательным потенциалом обладает именно графовая нейронная сеть, обгоняя по показателям наиболее продвинутой и результативную классическую модель предсказания.

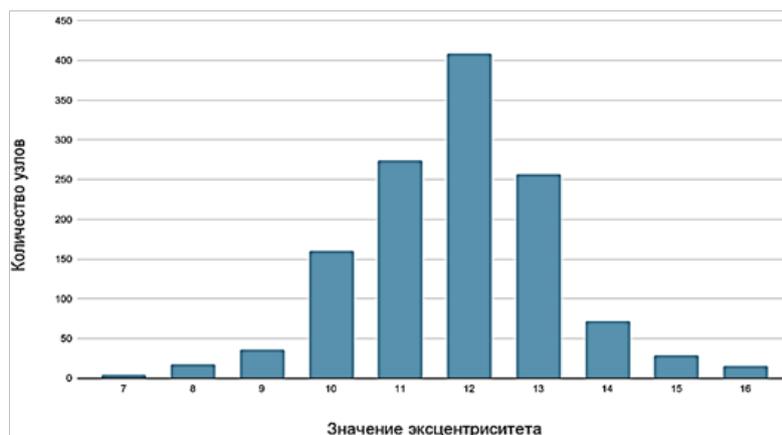


Рисунок 5 – График распределения эксцентриситета

Таблица 3 – Сравнение метрик исследуемых классических моделей и модели на основе графовой нейронной сети

Метрика	AAI	KI	NMF	GCN
AUC	0,63	0,71	0,73	0,76
AUC-ROC	0,65	0,73	0,74	0,77
Precision	0,46	0,64	0,69	0,79
Recall	0,60	0,72	0,74	0,74
F1-Score	0,52	0,68	0,71	0,76
Accuracy	0,79	0,82	0,87	0,84

По результатам исследования следует заключить, что задача предсказания связей на графе в условиях дефицита данных является решаемой, а инструмент для решения зависит от поставленных целей и возможностей исследователя. Графовые нейронные сети являются эффективным средством решения задач предсказания связей в социальном графе, в том числе в условиях дефицита данных в случае, если:

- дефицит имеет не критический характер;
- сами данные тщательно отобраны и подготовлены;
- модель обучена с постоянным контролем ключевых метрик;
- погрешность в предсказаниях допустима для решаемой задачи.

Выводы. В статье был произведен выбор данных, необходимых для анализа социальных связей. Основное внимание уделено сбору информации о явных связях, а также контекстным данным, таким как демографические характеристики, места работы, учебные заведения и сообщества, которые помогают расширить массив используемых для формирования обучающего датасета признаков. Также были учтены особенности законодательной базы.

Было создано программное обеспечение для сбора и обезличивания данных, использующее метод обхода графа с увеличением глубины охвата. Такой подход обеспечивает более полное использование контекстной информации о пользователях и снижает влияние ограничений приватности. Данные были предварительно отфильтрованы по коэффициенту полезности, что позволило сохранить только

достоверные и активные профили, исключив фейковые и неактуальные записи. На основе отобранных данных сформирован социальный граф, в котором вершины представляют пользователей, а ребра – их взаимные связи. Для визуализации структуры применен алгоритм *ForceAtlas2*.

Первичный анализ охватывал расчет ключевых метрик – средней взвешенной степени, диаметра, плотности и средней длины пути, что позволило оценить общую организацию сети. Дополнительно распределение эксцентриситета подтвердило репрезентативность данных, несмотря на их частичную несбалансированность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 № 152-ФЗ, ст. 3, п. 1 [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации. – Режим доступа: URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102108261> (дата обращения: 13.09.2025).
2. Статистика интернета и соцсетей на 2025 год: цифры и тренды в мире и в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.web-canape.ru/business/statistika-interneta-i-socsetej-na-2025-god-cifry-i-trendy-v-mire-i-v-rossii/> (дата обращения: 13.09.2025).
3. Социальная сеть ВКонтакте: документация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://vk.com/> (дата обращения: 26.09.2025).
4. Оферта об использовании VK ID [Электронный ресурс] // VK ID. URL: <https://id.vk.com/about/business/go/legal/vkid/offer> (дата обращения: 26.08.2025).
5. VK для разработчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://dev.vk.com/ru/rules> (дата обращения: 26.09.2025).
6. Зоткина А.А., Мартышкин А.И. Программа для анализа архетипов пользователей социальных сетей с использованием открытых данных профиля // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 99-102.
7. Зоткина А.А. Графовое представление структуры

социальной сети // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 96-98.

8. Морозов С.А., Морозова Н.И., Лозовик Е.Г. Применение информационных технологий для визуализации социального графа онлайн сети // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 1. – С. 55-64.

9. Морозова Н.И., Лозовик Е.Г., Морозов С.А., Береза Н.В. Интеллектуальный анализ социальных сетей на основе алгоритмов машинного обучения // Системы управления и информационные технологии. – 2024. – № 1 (95). – С. 89-95.

10. Журина А.А., Кочкаров А.А., Кочкаров Р.А. Анализ структурных характеристик социальных сетей // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2023. – Т. 21. – № 5. – С. 63-72.

11. Одинокое В.С., Мысева Е.Р. Графы социальных взаимодействий как инструмент для анализа клиентских сегментов // Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой: Материалы VII Международной студенческой научной конференции. Москва, 2025. – С. 211-217.

12. Мартышкин А.И., Зоткина А.А. Построение интеллектуальной системы обучения с использованием нейронных сетей // Современные информационные технологии. – 2021. – № 33 (33). – С. 97-102.

13. FOAF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/FOAF> (дата обращения: 26.08.2025).

14. NumPy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 03.09.2025).

15. OpenCV-Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://pypi.org/project/opencv-python/> (дата обращения: 03.09.2025).

16. Справочно-правовая система по законодательству Российской Федерации [Электронный ресурс] // Гарант.ру. – Режим доступа: URL: <https://base.garant.ru/70451476/> (дата обращения: 13.08.2025).

17. Gephi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://gephi.org/> (дата обращения: 03.09.2025).

18. GNU General Public License v3.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html> (дата обращения: 03.09.2025).

19. Kobourov, S. G. Spring Embedders and Force-Directed Graph Drawing Algorithms, 2012.

20. Jacomy, M., Venturini, T., Heymann, S., Bastian, M. ForceAtlas2, a Continuous Graph Layout Algorithm for Handy Network Visualization Designed for the Gephi Software, 2014.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 519.866: 630.9

EDN: LTOENY

К РАЦИОНАЛЬНОМУ ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОЙ МОДЕЛИ СЦЕНАРИЕВ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 5790-4606

AuthorID: 1260104

ORCID: 0009-0009-6196-4739

ДУБОВСКИЙ Сергей Викторович, аспирант

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
(194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, e-mail: svdub@mail.ru)*

SPIN: 6834-6156

AuthorID: 823284

ORCID: 0000-0002-0243-3104

ScopusID: 57246243700

ИВАНОВ Сергей Александрович, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Робототехнические системы и интеллектуальные технологии»

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова
(194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, e-mail: kemsit@mail.ru)*

Аннотация. Статья посвящена проблеме лесопользования, где актуальной задачей является поиск инструментов, позволяющих учитывать одновременно экономические, экологические и социальные факторы при принятии управленческих решений. Традиционные подходы в лесном хозяйстве ориентированы преимущественно на экономическую эффективность и не обеспечивают комплексной оценки всех аспектов использования лесных ресурсов. В настоящем исследовании представлено теоретическое обоснование структуры и параметров модели выбора оптимальных сценариев использования лесных участков, основанное на интеграции количественных и качественных параметров, множества альтернатив и системы критериев оптимальности. Работа имеет методологический характер и направлена на формирование концептуальных основ построения многокритериальной модели, позволяющей учитывать разнонаправленные интересы и ограничения при принятии решений в сфере лесопользования. Результаты исследования отражают универсальность предложенной теоретико-множественной структуры и её потенциальную применимость для поддержки принятия решений в лесном хозяйстве РФ. Представленная концепция формирует основу для последующих этапов – разработки, верификации и практической апробации модели на реальных данных. Практическая значимость работы заключается в возможности комплексной систематизации параметров и критериев оценки сценариев лесопользования, что способствует формированию сбалансированной политики управления лесными ресурсами, учитывающей долгосрочные интересы государства, бизнеса и общества.

Ключевые слова: лесные ресурсы, устойчивое лесопользование, системный анализ, многокритериальная оптимизация, теоретико-множественная модель.

TOWARDS A RATIONAL CHOICE OF A SET-THEORETICAL MODEL PARAMETERS FOR FOREST MANAGEMENT SCENARIOS

© The Author(s) 2025

DUBOVSKII Sergei Viktorovich, post-graduate student

*Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov
(194021, Saint Petersburg, Institutsky Lane 5, e-mail: svdub@mail.ru)*

IVANOV Sergei Alexandrovich, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of “Robotic Systems and Intelligent Technologies”

*Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov
(194021, Saint Petersburg, Institutsky Lane 5, e-mail: kemsit@mail.ru)*

Abstract. The article addresses the problem of forest management, where an urgent task is the search for tools that make it possible to simultaneously take into account economic, ecological, and social factors in decision-making. Traditional approaches in forestry are mainly focused on economic efficiency and do not provide a comprehensive assessment of all aspects of forest resource use. This study presents the theoretical justification of the structure and parameters of a model for selecting optimal forest use scenarios, based on the integration of quantitative and qualitative parameters, a set of alternatives, and a system of optimality criteria. The research has a methodological character and is aimed at forming the conceptual foundations for constructing a multi-criteria model that allows for the consideration of diverse interests and constraints in forest management decision-making. The results reflect the universality of the proposed set-theoretic structure and its potential applicability for supporting decision-making in the forest sector of the Russian Federation. The proposed concept serves as a foundation for subsequent stages – the development, verification, and practical testing of the model using real-world data. The practical significance of the study lies in the possibility of comprehensive system-

atization of parameters and evaluation criteria for forest use scenarios, contributing to the formation of a balanced forest resource management policy that accounts for the long-term interests of the state, business, and society.

Keywords: forest resources, sustainable forest management, systems analysis, multi-criteria optimization, set-theoretic model.

Для цитирования: Дубовский С.В. К рациональному выбору параметров теоретико-множественной модели сценариев лесопользования / С.В. Дубовский, С.А. Иванов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 76-81. – EDN: LTOENY.

Введение. Леса занимают значительные территории Российской Федерации, покрывая около 49% всей площади страны и составляя примерно 20% мировых лесных массивов [1]. Они являются не только ценнейшим экономическим ресурсом, но и важнейшим элементом экосистемы, играя ключевую роль в поглощении углекислого газа, регулировании климата, сохранении биоразнообразия и предотвращении эрозии почв [2]. Изменения климата, ужесточение природоохранных требований, оптимизация использования ресурсов – все это обуславливает повышение интереса к применению методов системного анализа в лесном хозяйстве.

Одним из принципов лесопользования в соответствии со статьей 12 Лесного кодекса РФ, является устойчивое управление лесами, сохранение биоразнообразия и повышение их потенциальной продуктивности [3]. В то же время, как показывает практика, зачастую лесные ресурсы используются неэффективно: значительная часть лесов остаётся вне хозяйственного оборота из-за удалённости, неразвитой инфраструктуры, возрастных и породных характеристик деревьев.

Оценка эффективности лесного хозяйства базируется на критериях бюджетной и экономической результативности [4]. В современных условиях спелые и перестойные насаждения составляют около половины объема всего лесного фонда [5], однако именно они обеспечивают значительную часть доходных поступлений в бюджет. Существенное влияние на уровень экономической эффективности оказывают такие факторы, как породный состав древостоев (в частности, доля мягколиственных пород), величина производственных затрат, удалённость лесных массивов и степень их инфраструктурной освоенности. Также эффективность лесопользования связана с глубиной переработки древесины, качеством породного и возрастного состава лесов, транспортной доступностью и экономическим состоянием лесной промышленности региона [6].

В условиях, когда хозяйственные, экологические и социальные аспекты могут конфликтовать, оправданным является применение многокритериальных моделей, которые позволяют системно оценить различные сценарии использования лесных участков. Такие модели могут учитывать множество параметров как количественных (запас древесины, возраст, расстояние до дорог и т.д.), так и качественных (тип почвы,

экологическая ценность, правовые ограничения и др.), а также критерии оценки (экономическая прибыль, срок окупаемости, экологические риски, социальные выгоды и т. д.) [7].

Цель данного исследования – разработка структуры и параметров модели, пригодной для оценки эффективности лесопользования в РФ, которая позволит выбирать оптимальные сценарии использования лесных участков с учётом всей совокупности экономических, экологических и социальных параметров и критериев.

Задачи исследования:

1. Оценить варианты использования лесных участков в РФ.

2. Сформировать по возможности полный список количественных и качественных параметров, влияющих на выбор сценария лесопользования.

3. Выявить критерии оптимальности ведения лесного хозяйства, позволяющие провести совокупную оценку экономической, экологической, технической и социальной составляющих.

4. Разработать методику выбора оптимального сценария использования лесного участка.

Методология. Устойчивое лесопользование как концепция определяется международными организациями как комплекс мероприятий, обеспечивающих баланс между экологическими, социальными и экономическими функциями лесов [3, 8]. В России управление лесами базируется на таких дисциплинах, как лесоустройство, таксация, лесоводство. В литературе часто рассматриваются сценарные модели управления лесами, где ключевым компонентом являются многокритериальные оценки, учитывающие риски, изменения климата, стоимости, доступность ресурсов и социальные факторы [9]. Например, исследования по адаптации лесохозяйственных мероприятий к климатическим изменениям в северной и средней тайге РФ демонстрируют, что экономические и экологические показатели необходимо сочетать при оценке сценариев [10].

В качестве экономических критериев оценки эффективности лесопользования обычно выступают:

1) традиционные показатели эффективности: чистая прибыль, рентабельность, срок окупаемости вложений;

2) сравнительный анализ альтернативных затрат и выгод в различных сценариях лесопользования (например, проведение рубки сейчас или отсрочка на несколько лет);

3) методы инвестиционного анализа, основанные на дисконтировании будущих доходов и расходов (чистая приведённая стоимость, внутренняя норма доходности и др.), которые особенно важны в долгосрочных проектах (лесовосстановление, создание защитных насаждений).

Экологические методы оценки эффективности использования лесных участков могут включать:

1) анализ воздействия лесопользования на биоразнообразие, устойчивость экосистем и состояние почвенных ресурсов;

2) оценку углеродного баланса лесов, их роли в смягчении последствий изменения климата;

3) исследование адаптивного потенциала лесных экосистем в условиях климатических изменений с использованием сценарных подходов.

Экономические и экологические оценки в сочетании позволяют более полно учесть не только доход, но и ущерб, существующие риски и долговременную устойчивость [11]. Также при разработке модели следует учитывать нормативные документы – Лесной кодекс РФ, правила лесовосстановления, ухода за лесами, проведения рубок ухода, санитарных и главных рубок, в которых определяются условия, порядок, стоимость и ограничения проведения мероприятий [3, 12-14]. При выборе параметров и критериев модели также важно учитывать принятую классификацию лесов (типы лесов – хвойные лиственные, смешанные; породы; возрастные группы; бонитеты – показатели качества лесных насаждений). Важным элементом являются экологические и охранные нормы, ограничения на участках, попадающих в особо охраняемые природные территории (ООПТ), защитные леса, водоохранные зоны и т.п.

Таким образом, экологическая и экономическая эффективности в лесном хозяйстве тесно связаны. Зачастую они вступают в противоречие – увеличение интенсивности вырубок снижает экологическую ценность лесных массивов, может привести к деградации биоразнообразия, а сохранение лесов снижает бюджетные поступления. Дополнительно к данным аспектам следует добавить и социальные составляющие – занятость населения на заготовке и обработке древесины, рекреационный потенциал лесных массивов для населения. В целом получается многокритериальная задача, условия которой отражает разнонаправленные интересы, а решение должно быть компромиссным. Применение методов многокритериального анализа позволит объединить экономические, экологические и социальные оценки в единой системе для выбора сценария, обеспечивающего устойчивое развитие лесного хозяйства.

Многокритериальные методы находят применение в задачах природопользования. Так в мировой практике достаточно широко используется метод анализа иерархий (*Analytic Hierarchy Process, AHP*) для выбора земельных участков, принятия решений при лесовосстановлении и для

оценки экологических последствий различных сценариев. В зарубежных исследованиях *AHP* применяют для установления баланса между сохранением биоразнообразия и максимизацией древесного производства. Метод приближения к идеальному решению (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS*) и другие многокритериальные методы принятия решений (*MCDM*) используются для ранжирования альтернатив по совокупности критериев эффективности, включая технико-экономические и экологические показатели [15-18]. Кроме того, в международной практике лесного хозяйства широко применяется линейное программирование (*LP*), в том числе в многокритериальной постановке, что позволяет решать задачи распределения ресурсов, планирования лесопользования и выбора оптимальных стратегий с учётом ограничений [19].

Применение методов многокритериальной оценки и сценарного анализа лесопользования России пока ограничено, однако они используются, в частности, при разработке адаптивных сценариев ведения лесного хозяйства в условиях климатических изменений [10].

В условиях многофункциональности лесов и наличия разнонаправленных интересов задача управления лесным участком может быть представлена как задача выбора оптимального сценария его использования. Основная цель – обеспечение устойчивого лесопользования с максимизацией экономической эффективности при соблюдении экологических и нормативных ограничений.

С точки зрения системного анализа лесной участок представляется сложной системой, включающей наряду с природными компонентами (породный состав, возраст насаждений, почвенные и климатические характеристики), технические и инфраструктурные факторы (наличие дорог, доступность для техники), а также социально-экономические факторы (потребности региона в древесине, интересы местных сообществ) [20].

Результаты. Для определенного лесного участка можно сформировать следующее множество альтернативных сценариев, отражающих наиболее типичные сценарии, применяемые в лесном хозяйстве РФ:

A_1 – проведение рубки главного пользования в текущем году;

A_2 – отсрочка рубки главного пользования на N лет (где $N \in \{1,3,5,10\}$);

A_3 – проведение рубок ухода (прореживание, осветление);

A_4 – санитарные рубки (в случае выявления поражённых древостоев);

A_5 – проведение лесовосстановительных мероприятий (подсадка или создание новых культур);

A_6 – формирование защитных насаждений (лесополосы, противопожарные барьеры);

A_7 – использование участка в рекреационных

целях (экотуризм, рекреационные зоны);

A_8 – сохранение участка без вмешательства (режим консервации).

Таким образом, множество альтернатив представляется в виде

$$A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8\},$$

где каждая альтернатива представляет собой сценарий лесопользования и характеризуется набором параметров – исходных данных, которые описывают природные, технические и экономические особенности участка и мероприятий. Параметры разделяются на две группы: количественные и качественные.

1) Количественные параметры (измеримые):

S_q – площадь участка (га);

A_q – возраст насаждений (лет);

D_q – средний диаметр ствола на высоте груди (см);

H_q – средняя высота деревьев (м);

F_q – полнота насаждений (0-1);

C_q – сомкнутость крон (0-1, таксационный показатель);

B_q – класс бонитета (таксационная характеристика продуктивности);

V_q – запас древесины на корню (м³);

G_q – прогноз прироста древесины (м³/га/год);

N_q – плотность посадки (шт/га);

L_q – наклон рельефа (град.);

E_q – высота над уровнем моря (м);

R_q – расстояние до дороги (км);

T_q – расстояние до пункта складирования/переработки (км);

Z_q – затраты на проведение мероприятия (руб/га);

K_q – стоимость аренды или использования техники (руб/смена);

W_q – ожидаемая выручка от реализации древесины (руб).

2) Качественные параметры (экспертные, категориальные):

Ws_c – породный состав насаждений (доминирующая и сопутствующие породы);

L_c – тип леса (еловый, сосновый, берёзовый и т. д.);

So_c – тип почвы (песчаная, суглинистая и др.);

St_c – состояние почвы (хорошее / истощённое / деградированное);

Sw_c – уровень заболоченности (низкий / средний / высокий);

A_c – доступность участка (хорошая / ограниченная / плохая);

Se_c – доступность в течение года (круглогодичный / зимний / летний);

I_c – наличие инфраструктуры (дороги, склады, энергетика);

Ec_c – экологическая ценность территории (наличие редких видов, близость к ООПТ);

Rk_c – опасность повреждений (вредители, болезни, пожары);

Rg_c – региональные особенности (темпы роста, экстремальные погодные условия);

Pr_c – правовые ограничения (защитные леса,

водоохранные зоны, заповедники);

S_c – социально-экономический фактор (близость к населённым пунктам, рекреационный потенциал).

Формально множество параметров можно представить, состоящим из следующих подмножеств численных P_q и категориальных P_c параметров:

$$P_q = \{S_q, A_q, D_q, H_q, F_q, C_q, B_q, V_q, G_q, N_q, L_q,$$

$$E_q, R_q, T_q, Z_q, K_q, W_q\},$$

$$P_c = \{Ws_c, L_c, So_c, St_c, Sw_c, A_c, Se_c, I_c, Ec_c, Rk_c,$$

$$Rg_c, Pr_c, S_c\}.$$

Для выбора наилучшего варианта используются целевые функции, составленные на основе исходных данных. В качестве критериев оптимальности определены следующие их подмножества:

а) подмножество экономических критериев:

$$C_e = \{P_e, T_e, R_e, NPV_e, IRR_e\},$$

где P_e – чистая прибыль (руб/га), T_e – срок окупаемости (лет), R_e – коэффициент рентабельности (%), NPV_e – чистая приведённая стоимость, при дисконтировании, IRR_e – внутренняя норма доходности для долгосрочных проектов;

б) подмножество экологических критериев:

$$C_{ec} = \{U_{ec}, B_{ec}, P_{ec}, D_{ec}, K_{ec}\},$$

где U_{ec} – углеродный баланс (способность леса к поглощению и сохранению углекислого газа, один из важнейших международных показателей), B_{ec} – сохранение биоразнообразия (низкое / среднее / высокое), P_{ec} – воздействие на почву (минимальное / допустимое / сильное), D_{ec} – риск деградации территории (заболочивание, эрозия), K_{ec} – устойчивость леса к климатическим изменениям (экспертная оценка);

в) подмножество технических критериев:

$$C_t = \{A_t, Z_t, I_t\},$$

где A_t – доступность участка для техники (балльная оценка), Z_t – затраты на транспортировку древесины (руб/м³), I_t – наличие техники и инфраструктуры (есть / ограничено / нет);

г) подмножество временных критериев:

$$C_v = \{S_v, Se_v\},$$

где S_v – срок выполнения работ (мес.), Se_v – сезонность (круглый год / зима / лето);

д) подмножество ресурсных критериев:

$$C_r = \{M_r, L_r, F_r\},$$

где M_r – требуемый объём техники (машино-смены), L_r – количество сотрудников (чел.), F_r – расход топлива и материалов (л/га или руб/га);

е) подмножество социальных критериев:

$$C_s = \{Z_s, R_s, I_s, So_s\},$$

где Z_s – влияние на занятость местного населения (создаёт / не влияет / сокращает), R_s – влияние на рекреационную значимость, I_s – соответствие интересам местных сообществ (конфликт / нейтрально / положительно), So_s – социальная значимость (например, сохранение рекреационных функций).

Общее множество критериев можно представить в виде

$$C = \{C_e, C_{ec}, C_t, C_v, C_r, C_s\}$$

Для систематизации задачи введём формальное описание модели в виде кортежа:

$$M = \langle P_q, P_c, A, C, F \rangle,$$

где P_q – множество количественных параметров, P_c – множество качественных параметров, которые могут быть переведены в числовую шкалу (например, используя шкалу Харрингтона), A – множество альтернатив, представляющих возможные сценарии лесопользования, C – множество критериев оптимальности, F – функция оптимальности, определяющая процедуру выбора наилучшей альтернативы на основе критериев. Последнюю можно получить с использованием метода взвешенных сумм, анализа иерархий (для определения весов критериев), метода оценки близости к идеальному решению или методов линейного программирования при наличии ресурсных и организационных ограничений.

Таким образом, описанная совокупность параметров теоретико-множественной модели позволяет отображать количественные и качественные характеристики лесного участка, оценивать эффективность лесопользования и выбирать оптимальный его сценарий по всем значимым критериям.

Обсуждение. Предложенные параметры теоретико-множественной модели выбора оптимального сценария лесопользования способны составить формализованный инструмент, позволяющий интегрировать исходные данные различной природы в единую систему. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на экономическую эффективность, здесь учитываются также экологические и социальные аспекты, что соответствует современным принципам устойчивого управления лесами.

Ключевым достоинством модели, привлекающей во внимание полную совокупность критериев эффективности, является ее универсальность, допускающей использование разных методов многокритериальной оптимизации, что позволяет адаптировать её к разнообразным условиям от задач стратегического планирования до выбора решений на местном уровне.

Вместе с тем, практическая реализация модели связана с определёнными ограничениями. Во-первых, требуется систематизация значительного объёма исходных данных, включая таксационные характеристики, экологические показатели и социальные факторы. Во-вторых, часть критериев (например, социальная значимость или устойчивость к климатическим изменениям) основывается на экспертных оценках, что может снижать объективность оценок. В-третьих, необходима апробация модели на реальных данных лесного хозяйства для проверки её практической применимости.

Сравнение с известными методиками, представленными в отечественной и зарубежной литературе, показывает, что наиболее распространены модели сценарного анализа, учитывающие

ограниченный круг факторов (как правило, экономических и экологических). Социальная составляющая как правило опускается. Предложенный подход к моделированию является более полным, так как объединяет все три ключевых компонента устойчивого развития: экономику, экологию и социальную сферу.

Выводы. В ходе исследования разработана структура теоретико-множественной модели выбора сценариев лесопользования, интегрирующей количественные и качественные параметры с множеством альтернативных сценариев и критериев оптимальности. Такая модель позволяет учитывать широкий спектр факторов – экономических, экологических, технических, ресурсных и социальных, обеспечивая комплексный подход к оценке вариантов использования лесных участков.

Вместе с тем, модель требует последующей апробации на реальных данных и верификации её эффективности в практической деятельности. В качестве перспективных направлений для дальнейших исследований можно выделить:

- 1) интеграция модели с геоинформационными системами для конкретизации анализа;
- 2) уточнение критериев оценки социальных и экологических факторов;
- 3) учёт в системе критериев прогнозируемых изменений климата;
- 4) разработка алгоритмов выбора сценариев для разных регионов.

Таким образом, представленная структура теоретико-множественной модели может служить основой для формирования более устойчивой и сбалансированной политики лесопользования в Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Глобальная оценка лесных ресурсов 2020 года – основной отчет / ФАО. – Рим, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.4060/ca9825ru> (дата обращения 27.09.2025).
2. Shvarts, E.A. Reforming Forest Policies and Management in Russia: Problems and Challenges / E.A. Shvarts, M.L. Karpachevskiy, N.M. Shmatkov, A.S. Baybar // Forests – 2023. – № 14(8). P. 1524. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.3390/f14081524> (дата обращения 27.09.2025).
3. Лесной кодекс РФ от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12050845/> (дата обращения 27.09.2025).
4. Nosova, S.S. Forest policy priorities: Forest management comparative analysis (Russia, Canada, Brazil and USA) / S.S. Nosova, R. Abdulov, Y.M. Medvedeva, D.V. Shiryaev, N.A. Kamenskikh // Journal of Environmental Management and Tourism. – 2016. – Vol. 7, No. 2(14). – P. 217–224. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://journals.aserspublishing.eu/jemt/article/view/327> (дата обращения 27.09.2025).
5. Беспалова, В.В. История изменений в экономической оценке лесных ресурсов для финансирования лесного хозяйства Российской Федерации / В.В. Беспалова // Лесоведение. – 2022. – № 2. – С. 213–224. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.31857/S0024114822020048> (дата обращения 27.09.2025).

6. Барейко, С.Н. Обеспечение устойчивого развития региона за счёт повышения эффективности использования лесных ресурсов (на примере Ленинградской области) / С.Н. Барейко, С.К. Кравченко // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2025. – № 4 (174). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.26726/grpe2025v4etsdo> (дата обращения 27.09.2025).
7. Yakovenko, N.A forest management system based on sustainable development / N. Yakovenko, N. Guseynova, A. Kolotushkin // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 93. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249301008> (дата обращения 27.09.2025).
8. Устойчивое управление лесами / FAO. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://www.fao.org/forestry/sfm/overview/ru> (дата обращения 27.09.2025).
9. Başkent, E.Z. An Updated Review of Spatial Forest Planning: Approaches, Techniques, Challenges, and Future Directions / E.Z. Başkent, J.G. Borges, J. Kaspar // Current Forestry Reports. – 2024. – Vol. 10. – P. 299–321. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00222-8> (дата обращения 27.09.2025).
10. Семёнов, М.А. Прогноз адаптивных приспособлений в лесном хозяйстве в связи с возможными климатическими изменениями / М.А. Семёнов, А.А. Высоцкий, В.И. Пашенко // Известия вузов. Лесной журнал. – 2019. – Вып. 5. – С. 57–69. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://10.17238/issn0536-1036.2019.5.57> (дата обращения 27.09.2025).
11. Veliz, F.B. Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach / F.B. Veliz, J.P. Watson, A. Weintraub, et al. // Annals of Operations Research. – 2015. – Vol. 232. – P. 259–274. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1608-4> (дата обращения 27.09.2025).
12. Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления: приказ Минприроды РФ от 29 декабря 2021 г. № 1024 (в ред. от 03.08.2023, с изм. действ. с 01.03.2025). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://docs.cntd.ru/document/728111110> (дата обращения 27.09.2025).
13. Об утверждении Правил ухода за лесами: приказ Минприроды РФ от 30 июля 2020 г. № 534. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://docs.cntd.ru/document/573290104> (дата обращения 27.09.2025).
14. Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах: постановление Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2047. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://docs.cntd.ru/document/573053313> (дата обращения 27.09.2025).
15. Nilsson, H. Decision support for Participatory Forest Planning using AHP and TOPSIS / H. Nilsson, E.-M. Nordström, K. Öhman // Forests. – 2016. – Vol. 7(5). – P. 100. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.3390/f7050100> (дата обращения 27.09.2025).
16. Chanpuypetch, W. An integrated AHP–TOPSIS approach for bamboo product evaluation and selection in rural communities / W. Chanpuypetch et al. // Decision Analytics Journal. – 2024. – Vol. 12. – P. 100503. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100503> (дата обращения 27.09.2025).
17. Paletto, A.A multi-criteria analysis of forest restoration strategies to improve the ecosystem services supply: An application in central Italy / A. Paletto et al. // Annals of Forest Science. – 2021. – Vol. 78(1). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.1007/s13595-020-01020-5> (дата обращения 27.09.2025).
18. Wang, L. Forest Land Quality Evaluation and the protection zoning of subtropical humid evergreen broadleaf forest region based on the PSO-TOPSIS model and the local indicator of spatial association: A case study of Hefeng County, Hubei Province, China / L. Wang et al. // Forests. – 2021. – Vol. 12(3). – P. 325. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://doi.org/10.3390/f12030325> (дата обращения 27.09.2025).
19. Korhonen, P. Multiple objective linear programming in supporting forest management / P. Korhonen // Forestry Sciences. – 1999. – P. 85–95. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL https://doi.org/10.1007/978-94-011-4483-4_7 (дата обращения 27.09.2025).
20. Shavazipour, B. Decision support for sustainable forest harvest planning using multi-scenario multiobjective robust optimization / B. Shavazipour, L.E. Sundström // arXiv preprint arXiv:2405.16612. – 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <https://arxiv.org/abs/2405.16612> (дата обращения 27.09.2025).

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК: 004.942

EDN: HOFOUW

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫМИ МЕТОДАМИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7082-9215

AuthorID: 607402

ORCID: 0000-0003-0622-5502

ScopusID: 57352554300

КАРПУХИН Эдуард Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11, e-mail: edvar1@rambler.ru)

Аннотация. В данной статье рассматриваются компьютерные методы и алгоритмы, положенные в основу работы универсальной информационной системы исследования магнитоэлектрических преобразователей перемещения. Одним из центральных моментов функционирования магнитоэлектрических преобразователей перемещения является передача информации посредством взаимодействия магнитных полей. Исследования таких взаимодействий для разных частных случаев проведены в работах многих авторов, но общая методика моделирования магнитных полей магнитоэлектрических преобразователей перемещения на настоящее время отсутствует. Поэтому целью статьи является попытка сделать обобщение известных моделей и магнитных полей магнитоэлектрических преобразователей перемещения и на его основе сформировать общую методику моделирования магнитных полей магнитоэлектрических преобразователей перемещения. Такая информационная система позволяет учитывать наиболее важные физические явления, происходящие при работе указанных устройств, в виде информационных процессов. В частности, в статье представлены алгоритмы формирования управляющих сигналов, расчета физических полей и магнитоэлектрических деформаций, а также учета влияющих на эти процессы факторов. С помощью предложенной информационной системы проведены исследования накладных магнитоэлектрических преобразователей перемещения и рассчитаны их основные числовые параметры. Сравнение результатов исследования с экспериментальными данными показало достаточно точное соответствие.

Ключевые слова: информационные системы, исследование магнитоэлектрических преобразователей перемещения, компьютерные методы, факторы влияния.

INFORMATION SYSTEM FOR RESEARCH OF MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCERS BY COMPUTER METHODS

© The Author(s) 2025

KARPUKHIN Eduard Vladimirovich, candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department of «Mathematics and physics»
Penza State Technological University

(440039 Russia, Penza, pr. Baidukova / ul. Gagarina, 1a /11, e-mail: edvar1@rambler.ru)

Abstract. This article discusses computer methods and algorithms that form the basis of a universal information system for studying magnetostrictive displacement transducers. One of the central points of magnetostrictive displacement transducers operation is the transfer of information through the interaction of magnetic fields. Studies of such interactions for different private cases have been carried out in the works of many authors, but there is currently no general method for modeling magnetostrictive displacement transducers magnetic fields. Therefore, the purpose of the article is to attempt to summarize magnetostrictive displacement transducers known models and magnetic fields and, on its basis, to form a general methodology for modeling magnetostrictive displacement transducers magnetic fields. This information system allows for the consideration of the most important physical phenomena occurring during the operation of these devices in the form of information processes. In particular, the article presents algorithms for generating control signals, calculating physical fields and magnetostrictive deformations, and taking into account the factors that influence these processes. Using the proposed information system, the article conducts research on surface-mounted magnetostrictive displacement transducers and calculates their main numerical parameters. A comparison of the research results with the experimental data showed a fairly accurate correspondence.

Keywords: information systems, research on magnetostrictive displacement transducers, computer methods, influence factors.

Для цитирования: Карпухин Э.В. Информационная система исследования магнитоэлектрических преобразователей перемещения компьютерными методами/ Э.В. Карпухин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 82-87. – EDN: HOFOUW.

Введение. Современные требования к точности и быстродействию систем измерения и контроля обуславливают необходимость создания точных математических моделей и эффективных алгоритмов обработки сигналов, в частности, в составе магнестрикционных преобразователей перемещений (МПП). Традиционные аналитические методы не позволяют в полной мере учесть сложность взаимосвязанных физических процессов, происходящих в таких устройствах.

Все МПП, известные на сегодняшний день, являются сложными техническим устройствами, имеющими разнообразную структуру, определяемую их назначением, функциональными возможностями, условиями работы и другими факторами. Существенное влияние на работу МПП оказывают параметры технологического объекта, на котором он установлен. К основным из них можно отнести: параметры резервуара с контролируемой средой, расстояния и зазоры между элементами МПП и технологического объекта, его физические свойства [1]. Обобщенная структура МПП описана в статье «Обобщенная методика математического моделирования магнитных полей магнестрикционных преобразователей перемещения» авторов Карпухина Э.В. и Дементьевой Е.С., опубликованной в журнале «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс» в 2021 году, том 10.

Использование известных схем МПП и методик их исследования, приведенные например в [1, 2], позволяет создать обобщенную информационную систему, реализующую наиболее важные модели физических явлений в виде информационных процессов, описанных в [3], и подходящую для исследования всех известных типов МПП. Обобщенно алгоритм работы системы описан в статье «Квантово-классический алгоритм исследования магнестрикционных явлений на микроуровне» автора Карпухина Э.В., опубликованной в журнале «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс» в 2024 году, том 13.

Рассмотрим процесс разработки комплексных компьютерных методов и моделей описания физических процессов МПП как информационных систем, обеспечивающих высокую точность исследования МПП и эффективность обработки сигналов.

Работу МПП можно упрощенно представить как последовательность взаимосвязанных информационных процессов [2]:

1. Процесс записи: Электрический импульс тока → Магнитное поле → Магнестрикционная деформация → Ультразвуковая волна.

2. Процесс чтения: Отраженная волна → Изменение магнитного поля → Изменение магнитного потока → Выходная э.д.с.

Более подробно работа информационной системы, имитирующей эти процессы, представлена схемой алгоритма, показанной на рисунке 1.

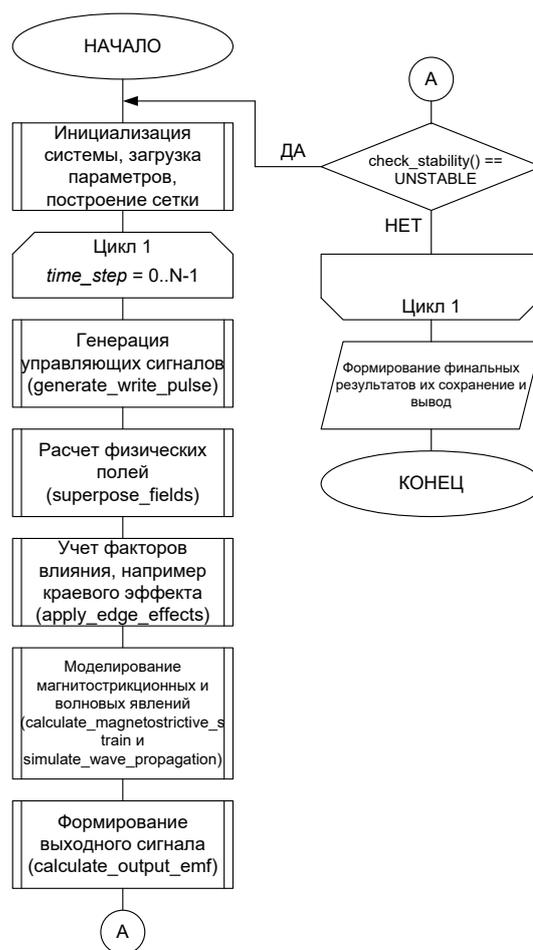


Рисунок 1 – Схема алгоритма работы информационной системы исследования МПП

Рассмотрим далее варианты реализации алгоритмов наиболее важных процедур этой схемы.

Методология. Процедура генерация управляющих сигналов в соответствии с [4] описана алгоритмом, схема которого показана на рисунке 2.

Процедуры расчета физических полей описаны алгоритмами, схемы которых показаны на рисунке 3. Здесь а) *calculate_coil_field()* – алгоритм расчета поля катушки, б) *calculate_bias_field()* – алгоритм расчета поля подмагничивания, в) *calculate_permanent_magnet_field()* – алгоритм расчета поля постоянного магнита, г) *superpose_fields()* – алгоритм расчета результирующего поля (суперпозиции всех полей).

Учет возможных факторов влияния, таких как краевой и поверхностный эффекты, экранирование и т.д., должен быть выполнен с помощью соответствующего алгоритма. Например, влияние краевого эффекта учитывается с помощью алгоритма, показанного на рисунке 4.

Исследование магнестрикционных явлений описано алгоритмом, показанным на рисунке 5: а) *calculate_magnetostrictive_strain()* – алгоритм расчета магнестрикционного преобразования, б) *calculate_hysteresis(H_current, H_previous)* – алгоритм функции расчета гистерезиса.

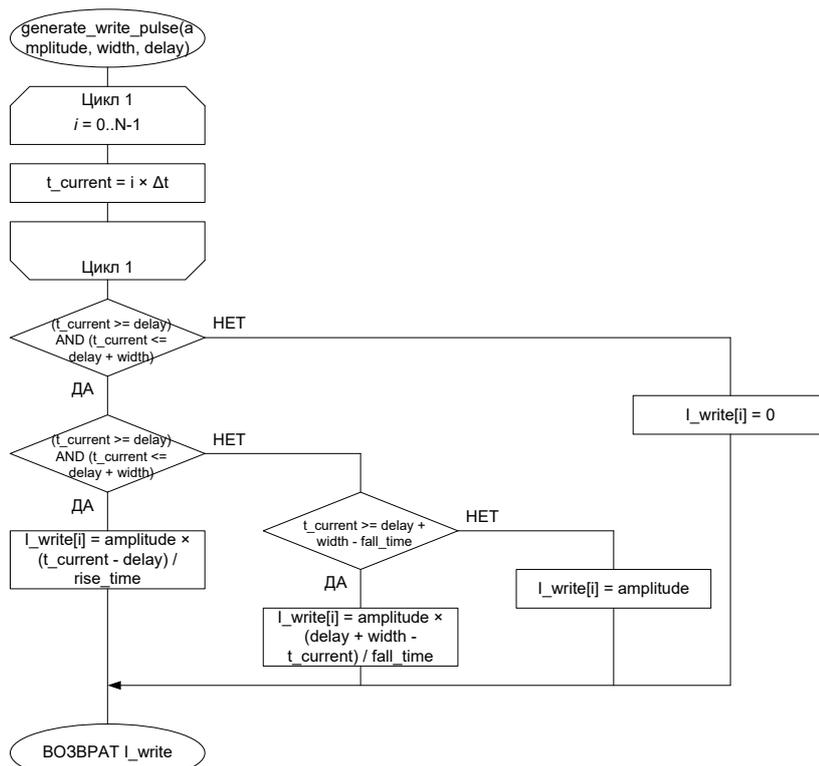


Рисунок 2 – Схема алгоритма генерации управляющих сигналов

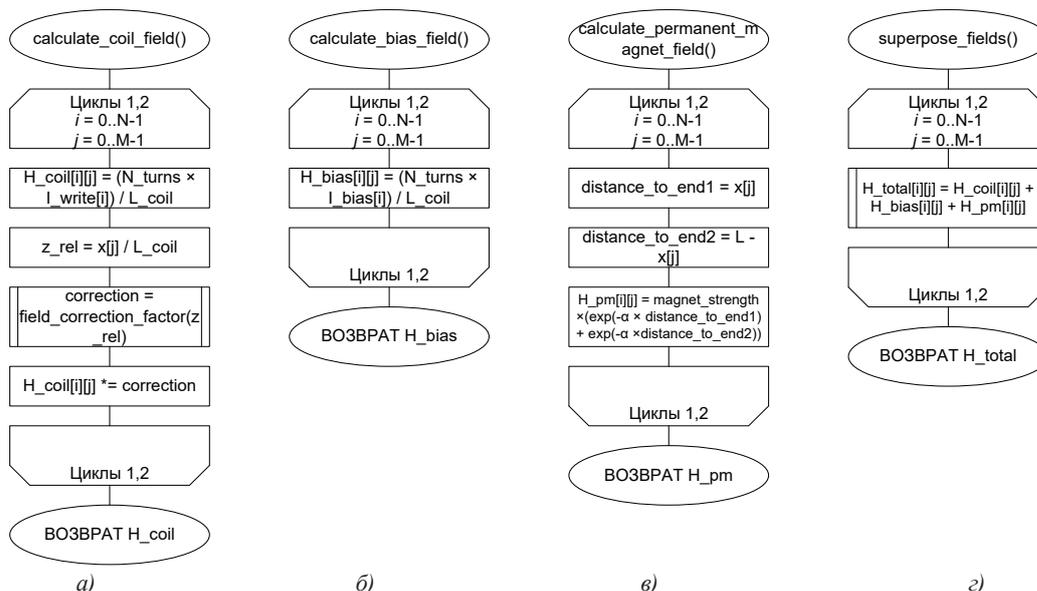


Рисунок 3 – Схемы алгоритмов процедур расчета физических полей

Представленная схема информационной системы исследования МПП (рис. 1) в дальнейшем может быть дополнена модулями предварительной фильтрации, детекции отраженных импульсов, проверки устойчивости вычислений, адаптивной коррекции параметров, расчета метрик качества и т.д., что позволит с ее помощью исследовать практически все типы существующих магнитоотричных устройств с высокой точностью и эффективностью.

Результаты. Для примера рассмотрим численное моделирование МПП накладного типа [5] со

следующими параметрами:

- длина магнитоотричного звукопровода (МЗП): $L = 0.5$ м,
- диаметр МЗП: $d = 2$ мм,
- материал МЗП: никелевый сплав с постоянной магнитоотричности $\lambda_s = 33 \times 10^{-6}$,
- число витков катушки: $N = 1000$,
- частота дискретизации: $f_s = 2$ МГц,

С помощью предложенной информационной системы были получены следующие графические зависимости сигналов МПП, показанные на рисунке 6.

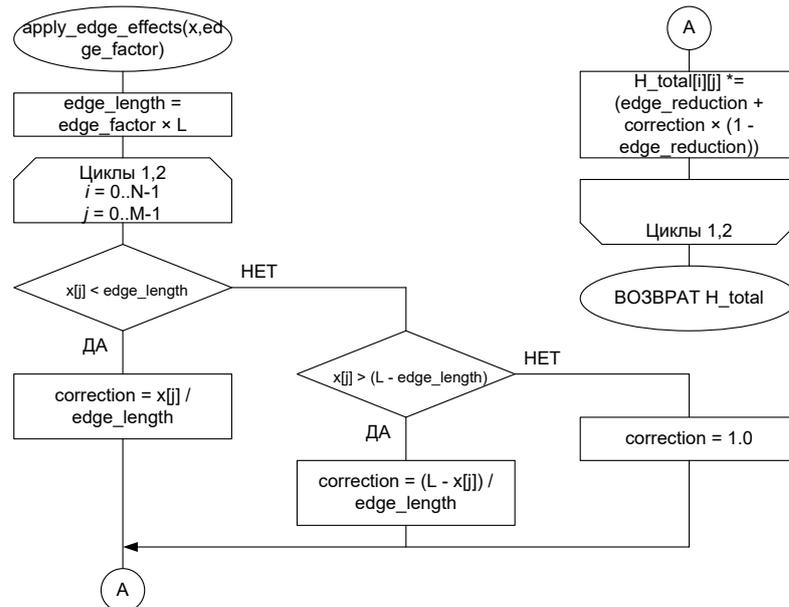


Рисунок 4 – Схема алгоритма учета краевого эффекта

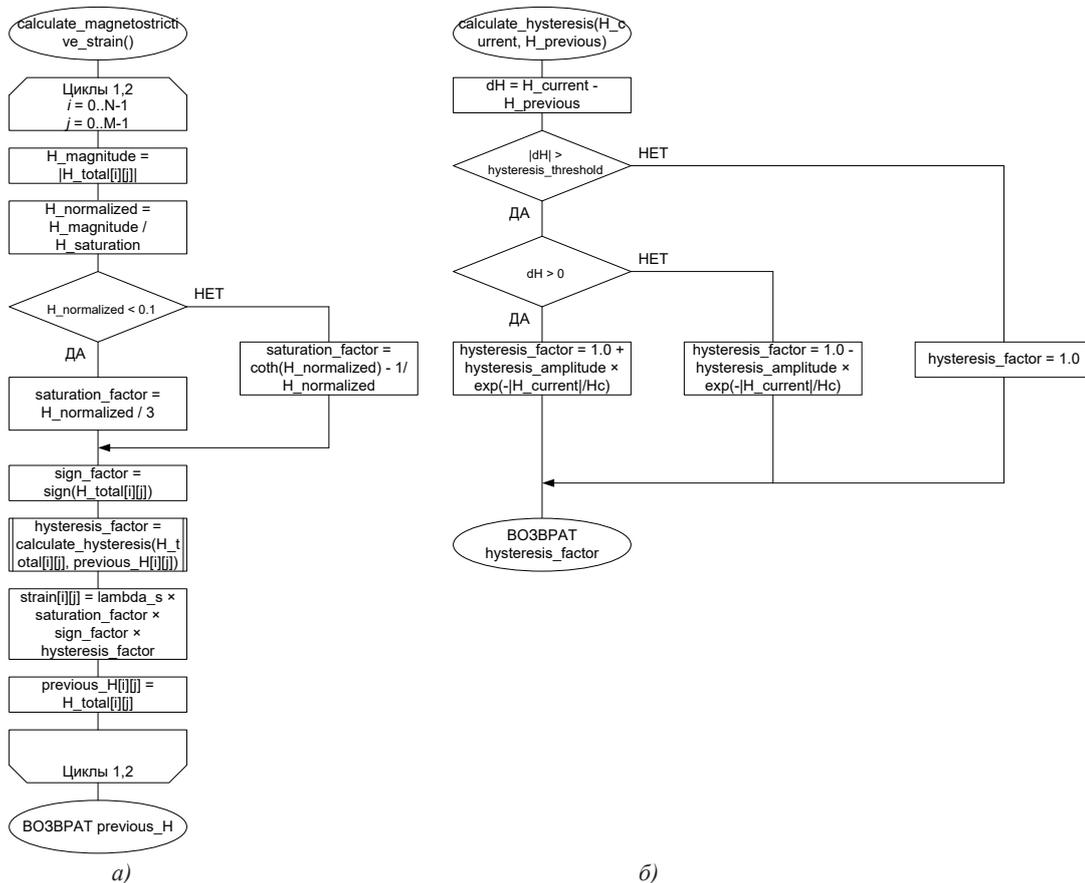


Рисунок 5 – Схемы алгоритмов исследования магнитострикционных явлений

Обсуждение. В результате исследования МПП с помощью представленной информационной системы рассчитаны основные числовые параметры, а именно [6]:

1. Временные характеристики:

- время распространения волны: $t_{prop} \approx 98,7$ мкс,
- длительность отраженного импульса: $\Delta t \approx 2$ мкс,
- амплитуда выходной э.д.с.: $e_{max} \approx 130,37$ мВ.

2. Частотные характеристики:

- основная частота колебаний: $f \approx 250$ кГц,
- ширина спектра по уровню -3 дБ: $\Delta f \approx 500$ кГц,
- отношение сигнал/шум: $SNR \approx 25$ дБ.

3. Точностные характеристики:

- среднеквадратичная погрешность измерения: $\sigma \approx 0.1$ мм,
- разрешающая способность: $\Delta l_{min} \approx 0.5$ мм.

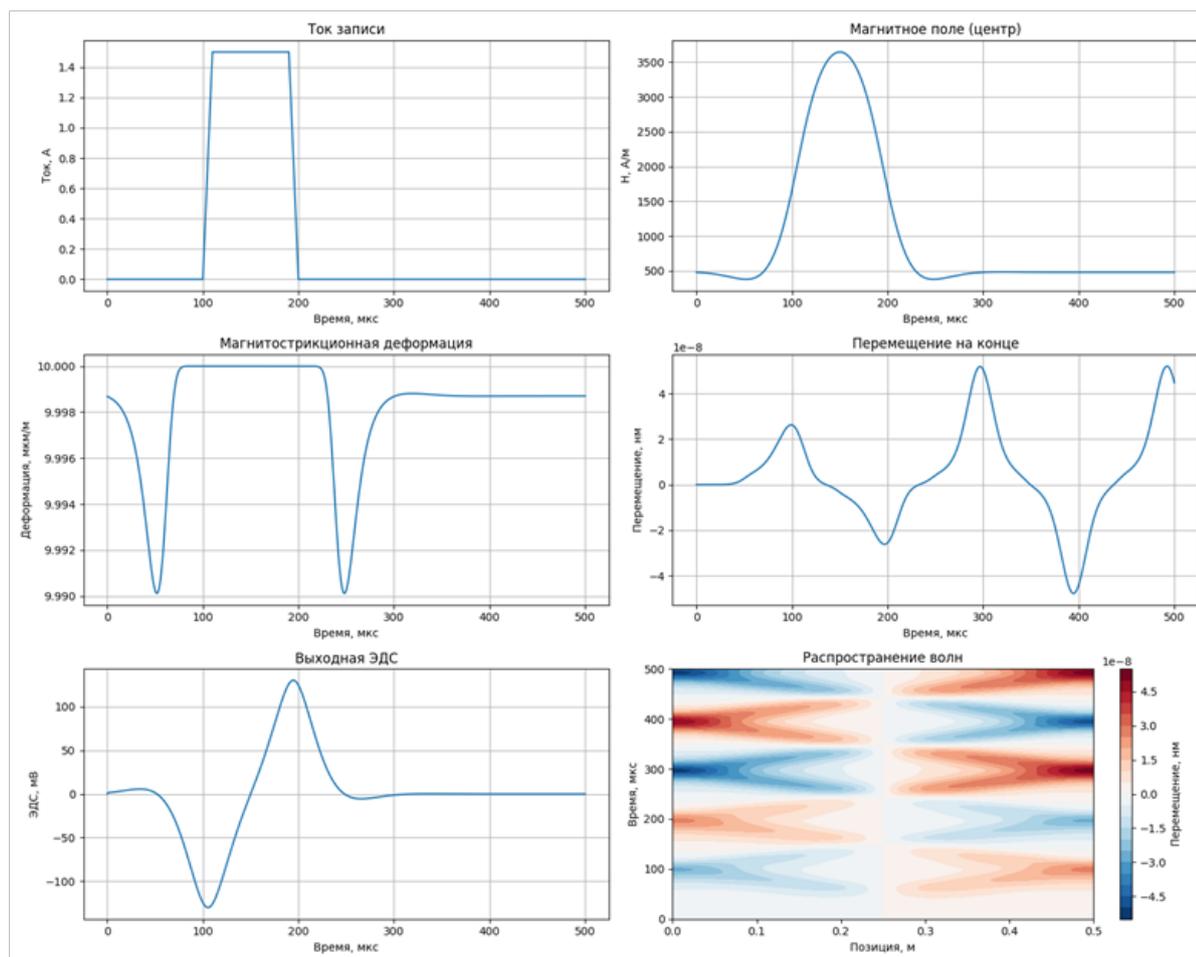


Рисунок 6 – Выходные данные информационной системы

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошее соответствие [7]:

- отклонение по амплитуде: не более 8%,
- отклонение по времени распространения: не более 3%,
- корреляция формы сигналов: $R > 0.95$.

Таким образом, были разработаны компьютерные методы и модели описания физических явлений в МПП как информационных систем. Разработаны алгоритмы цифровой обработки сигналов, адаптированные для специфики МПП, которые могут быть применены в составе других информационных систем [8-19].

Выводы. В рамках исследования на основе обобщенной структуры МПП, описывающей принцип действия всех известных на настоящий момент МПП, отражающей обязательные конструктивные элементы и наиболее значимые физические процессы, лежащие в основе их работы, разработаны компьютерные методы и модели описания физических процессов МПП, реализованные в виде информационной системы исследования всех известных типов МПП, учитывающей взаимосвязь их физических процессов и параметров.

В базовом варианте эта система включает

следующие основные процедуры:

- Генерации управляющих сигналов (рис. 2).
- Расчета физических полей (рис. 3).
- Учета возможных факторов влияния, таких как краевой (рис. 4) и поверхностный эффекты, экранирование, и т.д.
- Моделирования магнитоэлектрических явлений (рис. 5).
- Формирования выходных сигналов МПП, например э.д.с. и др. (рис. 6).

Разработаны алгоритмы цифровой обработки сигналов, адаптированные для специфики МПП, сравнение результатов работы которых с экспериментальными данными показало хорошее соответствие: отклонение по амплитуде выходных сигналов составило не более 8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Карпухин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоэлектрических устройств: Дис.канд. техн. наук. – Пенза, 2012. – 157 с.
2. Демин С.Б. Магнитоэлектрические системы для автоматизации технологического оборудования: Монография. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2002. – 182 с.
3. Карпухин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоэлектрических устройств: Монография/ Э.В. Карпухин, С.Б. Демин. – Пенза: ПензГТУ, 2014. – 116 с.
4. Карпухин Э.В. Increasing the Efficiency of Calculation of

Magnetic Fields of Magnetostriction Level Gauges, XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, (год публикации - 2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_10.

5. Карпухин Э.В., Бормотов А.Н. Complex of programs for studying magnetic fields of magnetostriction level converters EDP Sciences, E3S Web of Conferences, 2023, 376, 01102 (год публикации - 2023) <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202337601102>.

6. Карпухин Э.В., Бормотов А.Н. Numerical methods to calculate magnetic fields of magnetostriction level converter EDP Sciences, E3S Web of Conferences, 2023, 376, 01101 (год публикации - 2023) <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202337601101>.

7. Карпухин Э.В., Бормотов А.Н., Манукян Л. Modeling the Properties of Magnetostrictive Elements Using Quantum Emulators, Computation, 2024, 12, 147 (год публикации - 2024) <https://doi.org/10.3390/computation12070147>.

8. Карпухин Э.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684911 «Программный модуль разложения гамильтониана в произвольный базис Паули. Оpubл. 22.10.2024.– Бюл. №11.

9. Карпухин Э.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024685348 «Программный модуль квантового эмулятора моделирования физических систем. Оpubл. 30.10.2024.– Бюл. №11.

10. Кайзер С. Изучаем квантовые вычисления на Python и Q#. С. Кайзер, К. Гранад. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 430 с.

11. Карпухин Э.В. LU-Factorization of the System of Magnetic Field Equations of Magnetostrictive Level Transducers, XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021", Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Т.247. – №2. – С.113-123. (год публикации - 2021) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1>

12. Баженов Ю.М. Сверхтяжелый бетон для защиты от радиации/ Ю.М. Баженов, А.П. Прошин, А.И. Еремкин, Е.В. Королев, А.Н. Бормотов// Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 6-9.

13. Бормотов А.Н. Имитационное моделирование деструкции и метод прогнозирования стойкости композиционных материалов/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королев// Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 113-118.

14. Прошин А.П. Методологические принципы выбора оптимальных наполнителей композиционных материалов/ А.П. Прошин, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.Н. Бормотов// Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 10 (550). – С. 15-20.

15. Бормотов А.Н. Методика представления композиционного материала как объекта исследования и моделирования/ А.Н. Бормотов, Е.А. Колобова, Ю.В. Конопацкий// Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 44-51.

16. Королев Е.В. Глетглицериновые строительные материалы для защиты от радиации/ Е.В. Королев, А.Н. Бормотов, А.С. Иноземцев, С.С. Иноземцев// Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 69-71.

17. Бормотов А.Н. Методологические принципы математического моделирования и синтеза композиционных материалов из отходов нефтепереработки/ А.Н. Бормотов, М.В. Кузнецова, Е.А. Колобова// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 85-94.

18. Коновалова И.И. Алгоритм настройки адаптивных регуляторов/ И.И. Коновалова, С.В. Селезнёва, А.Н. Коновалов, А.Н. Бормотов// В мире научных открытий. – 2013. – № 6 (42). – С. 22-33.

19. Бормотов А.Н. Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, М.В. Кузнецова// Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – Т. 64. № 2. – С. 110-118.

Статья поступила в редакцию 10.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 681.3.012
EDN: JXXMSW

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 2949-0400
AuthorID: 13697
ORCID: 0000-0003-1247-472
ResearcherID: E-3701-2014

БИКТАШЕВ Равиль Айнулович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: rabiktashev@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-6013-4487

НИКИТИН Даниил Дмитриевич, аспирант
Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: nddpnz@gmail.com)

SPIN: 8706-6920
ORCID: 0009-0001-8838-5181

СЕМЁНОВ Андрей Олегович, старший преподаватель кафедры «Вычислительная техника»
Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: andre20071@yandex.ru)

Аннотация. В настоящее время по мере увеличения числа и сложности задач, производительность и время реакции операционной системы становятся более критичными показателями эффективности, особенно для систем реального времени. Однако даже в современных операционных системах многие системные вызовы, в том числе связанные с выполнением функций планирования задач, не используют техники аппаратного ускорения, а реализуются на основе программного обеспечения, что приводит к значительным задержкам выполнения прикладных процессов. Для обеспечения высокой производительности необходимо применение специализированного аппаратно-ориентированного планировщика, реализованного в виде ускорителя (сопроцессора). Существует два базовых алгоритма планирования с разделением времени – с общей очередью готовых к выполнению задач и с индивидуальными очередями. При проектировании операционных систем реального времени необходимо выбрать наиболее оптимальный из них для использования в устройстве аппаратной поддержки. Целью работы является получение сравнительных характеристик вышеуказанных алгоритмов планирования по критерию производительности.

Ключевые слова: многопроцессорная система, система массового обслуживания, аппаратный ускоритель планирования, имитационное моделирование, сеть Петри.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TIME-SPLIT PLANNING ALGORITHMS FOR MULTIPROCESSOR SYSTEMS BY MEANS OF SIMULATION MODELLING BASED ON PETRI NETS

© The Author(s) 2025

BIKTASHEV Ravil Ainulovich, candidate of technical sciences,
associate professor of sub-department «Computer Engineering»

Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya street, 40, e-mail: rabiktashev@mail.ru)

NIKITIN Daniil Dmitrievich, post-graduate student
Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya street, 40, e-mail: nddpnz@gmail.com)

SEMENOV Andrei Olegovich, senior lecturer of sub-department «Computer Engineering»
Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya street, 40, e-mail: andre20071@yandex.ru)

Abstract. Currently, as the number and complexity of tasks increases, operating system performance and response time become more critical, especially for real-time systems. However, even in modern operating systems, many system challenges, including those related to task planning functions, do not use hardware acceleration techniques but are implemented on the basis of software. This results in significant application processing delays. To ensure high performance, it is necessary to use a specialized hardware-oriented planner implemented in the form of an accelerator (coprocessor). There are two basic time-sharing planning algorithms: with a common sequence of tasks ready for execution and with individual sequences. When designing real-time operating systems, it is necessary to choose the most optimal one for use in a hardware support device. The aim of the work is to obtain the comparative characteristics of the above-mentioned planning algorithms according to the performance criterion.

Key words: multiprocessor system, queueing system, hardware planning accelerator, simulation, Petri net.

Для цитирования: Бикташев Р.А. Сравнительный анализ алгоритмов планирования с разделением времени для многопроцессорных систем методом имитационного моделирования на основе сетей Петри / Р.А. Бикташев, Д.Д. Никитин, А.О. Семёнов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 88-97. – EDN: JXXMSW.

Введение. Традиционно как однопроцессорные, так и многопроцессорные (многоядерные) операционные системы (ОС) реализуются на основе программного обеспечения и выполняются в ядре ОС. Производительность такого подхода невелика из-за высоких накладных расходов, связанных с обработкой системных запросов, что ограничивает использование таких ОС в многопроцессорных (многоядерных) системах, обрабатывающих задачи реального времени с мелкозернистым параллелизмом [1]. Значительные временные потери возникают в подсистеме управления процессами и ресурсами, в том числе при программной обработке алгоритмов планирования, которые зачастую основаны на очередях. Такие программные решения успешно применяются для относительно простых систем реального времени (СРВ), содержащих ограниченное количество задач. Однако по мере увеличения числа и сложности задач производительность и время реакции становятся более критичными, особенно для систем, надежность которых имеет решающее значение. Требованием к надежности операционных систем реального времени (ОСРВ) считается соблюдение сроков выполнения задач, поскольку задержка рассматривается как отказ системы. Поэтому для обеспечения высокой производительности необходимо применение специализированного планировщика задач систем реального времени [1].

Исследователи все больше внимания уделяют аппаратной поддержке функции планирования процессов для повышения производительности операционных систем реального времени [1-4, 8] благодаря применению современной элементной базы универсального назначения – программируемых вентильных матриц FPGA (*Field Programmable Gate Array*) относительно низкой стоимости. А реализация планировщика как независимого устройства позволит увеличить не только производительность и надежность ОСРВ, но и ускорить разработку и сократить размер системного программного обеспечения. Кроме того, достигается упрощение процедур тестирования и верификации ПО за счет использования возможности переноса части функционала в унифицированные блоки аппаратного ускорения функций управления доступом к критическим ресурсам [5]. Вынесение функции планирования из ядра ОС в специализированное устройство позволит многократно повысить реакцию на запрос прикладного процесса, сократить накладные расходы на обработку API запросов, а освободившееся при этом процессорное время использовать для выполнения прикладных задач [4].

Значительные задержки в выполняющиеся процессы вносят алгоритмы планирования с разделением времени, основанные на очередях типа FIFO (*First In – First Out*). Существуют два типа таких алгоритмов: с общей очередью готовых к выполнению задач, разделяемой всеми процессорами, и с индивидуальными очередями по одной в каждом процессорном узле. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, поэтому целью настоящей работы ставится выбор наиболее оптимального алгоритма (с точки зрения производительности) для применения при разработке планировщиков с аппаратной поддержкой для встраиваемых систем реального времени [18]. Задача заключается в выявлении алгоритма, создающего меньше задержек при реализации прикладных задач. За базу был принят алгоритм, основанный на классической задаче «спящий парикмахер» [6, 7], расширенный до алгоритма «работа парикмахерской» [8], который обеспечивает параллельную обработку по типу «клиент-сервер» на N процессорах. Следует отметить, что такой алгоритм можно описать в рамках систем и сетей массового обслуживания [9] с получением вероятностно-временных характеристик, но с рядом ограничений, которые обсуждаются в конце статьи.

В работе [6] была проведена формализация алгоритмов управления процессами и ресурсами на языке недетерминированных автоматов (НДА), позволяющая выявлять свойства и правильность работы алгоритмов, а также осуществлять их аппаратную реализацию. В работе [12] показано простое преобразование автоматной модели в модель на языке сетей Петри, достоинством которой является возможность использования инструментальных средств имитационного моделирования на уровне структуры [13]. В качестве такого инструментального средства применена система моделирования *CPN Tools* [10], где используются цветные сети Петри, позволяющие синтезировать наглядные модели систем высокой сложности, получать временные характеристики устройства в динамическом режиме, а также определять загрузку отдельных блоков и выявлять узкие места.

Методология. Модель многопроцессорного планировщика с общей очередью задач типа FIFO, представленная в виде упрощенной системы массового обслуживания, показана на рисунке 1. Вновь поступившая задача помещается планировщиком в конец очереди, а задачи из начала очереди назначаются диспетчером на выполнение в процессор. Когда один из процессоров освобождается, он переводится в режим ожидания до момента

назначения ему новой задачи. Таким образом, планирование в этом случае производится на двух уровнях: на уровне задач (процессов) и на уровне процессоров, что несколько усложняет алгоритм.

Будем считать, что ОС функционирует в пакетном режиме, т.е. обслуживающий процессор выполняет

работу без переключения до её завершения или до момента блокирования, например, при обращениях к некоторому ресурсу.

Если блокировка произошла, то по её окончании процесс помещается в конец очереди для продолжения обслуживания [9].

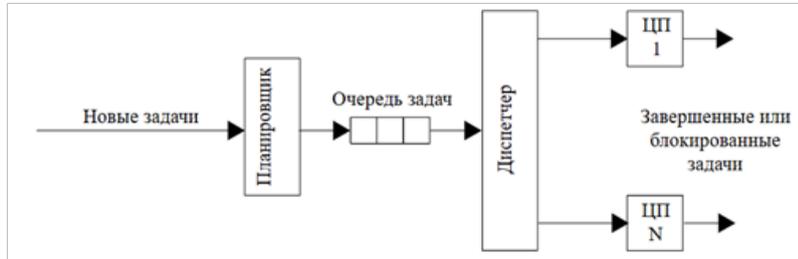


Рисунок 1 – Модель устройства планирования с общей очередью задач

Алгоритм планирования на основе общей очереди. Данный алгоритм основан на стратегии разделения времени, обеспечивающий автоматическую балансировку загрузки процессоров [7, 9]. В основе задачи планирования лежит классическая клиент-серверная стратегия, где в качестве сервера выступают процессоры, а в качестве клиентов – задачи [7]. Действия клиента и сервера должны быть согласованы, т.е. находящаяся в очереди задача должна дождаться освобождения одного из процессоров для её обработки, и наоборот, свободный процессор ожидает появления новой задачи. Достижение согласования осуществляется применением барьерной синхронизации, называемой иногда «рандеву» [11]. Для формального описания алгоритмов планирования применена логика недетерминированных автоматов [6].

Формальное описание алгоритма основано на введении следующих событий (состояний НДА): S_i^t , S_s^{pj} – поступление на обслуживание новой задачи и

наличие свободного процессора, соответственно; S_{FQ}^t – в очереди имеются свободные места; S_O^t , S_{SZ}^{pj} – в очереди имеется задача и ожидающий процессор, соответственно; S_{ZP}^t , S_{PZ}^{pj} – поступил запрос задачи от j -го процессора, а j -й процессор выдал подтверждение запроса, соответственно; S_{GP}^t , S_{PT}^{pj} – задача готова к обслуживанию и j -й процессор её принял, соответственно; S_A^{pj} , S_E^{pj} – j -й процессор выполняет задачу, и выполнение её закончено, соответственно; S_{TO}^t , S_{RT}^{pj} – снятие задачи с исполнения и выдача результата, соответственно; S_{OF}^t – удаление задачи из очереди [3, 14].

Алгоритм планирования с общей очередью, представленный в виде графа НДА, показан на рисунке 2.

Система логических уравнений [3] для планировщика с общей очередью задач имеет вид, представленный ниже. Рассмотрим реализацию клиентской части процесса планирования до момента осуществления барьерной синхронизации.

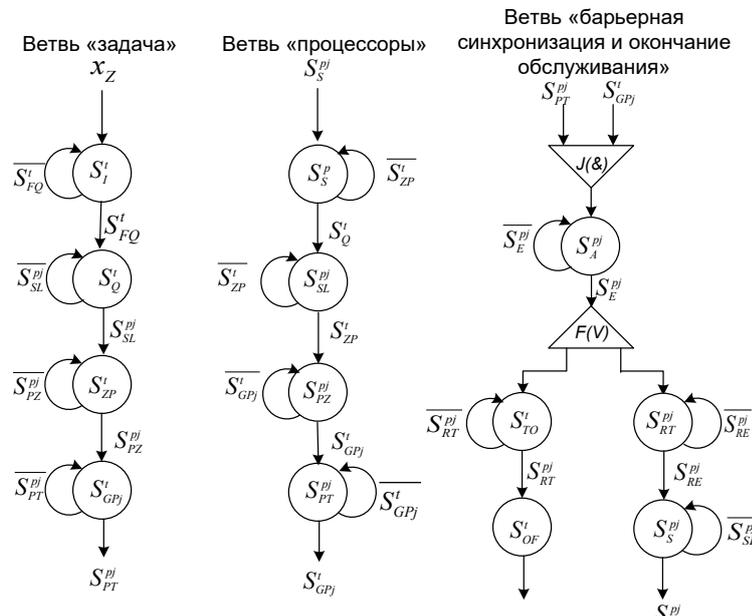


Рисунок 2 – Граф НДА алгоритма планирования задач

Уравнения для всех событий можно получить из графа НДА по методике, представленной в [6]. Так события, обозначающие ожидание занесения задачи в очередь, представляются уравнениями:

$$S_i^t(t+1) = xz \vee S_{FQ}^t, \\ S_Q^t(t+1) = S_i^t S_{FQ}^t \vee S_Q^t S_{SL}^{pj}, \quad (1)$$

где через xz обозначен сигнал запроса задачи на вхождение в очередь. События, обозначающие выбор обслуживающего процессора, обозначаются как:

$$S_S^p(t+1) = \bigvee_{j \in N} S_S^{pj} \vee S_S^p S_{ZP}^t, \\ S_{SL}^{pj}(t+1) = S_S^p S_Q^t \vee S_{SL}^{pj} S_{ZP}^t \quad (2)$$

где N – число процессоров в многопроцессорной системе. События, обозначающие освобождение процессора после обслуживания очередной задачи и выдачи результата, имеют вид:

$$S_{RT}^t(t+1) = S_A^{pj} S_E^{pj} \vee S_{RT}^t S_{TO}^{pj}, \\ S_{OF}^t(t+1) = S_{TO}^{pj} S_{RT}^t \quad (3)$$

Аналогично составляются уравнения для событий готовности задачи S_{GP}^t и готовности процессора к обслуживанию S_{PT}^{pj} , а также события выполнения задачи j -м процессором S_A^{pj} [6]. В этих уравнениях операторы $J(\&)$ и $F(V)$ обозначают, соответственно, объединение и разветвление параллельных процессов, действующих в алгоритмах планирования. Причем оператор $J(\&)$ выполняет барьерную синхронизацию двух процессов, протекающих в ветвях «задача» и «процессор».

Канонические уравнения позволили верифицировать алгоритмы планирования путем простого преобразования их в модель на языке VHDL [18]. Моделирование в системе Xilinx ISE показало структурную реализуемость алгоритмов планирования в аппаратных средствах, а полученные вре-

менные диаграммы показали корректность их функционирования, что также подтверждается работами [16, 17].

Алгоритм планирования на основе индивидуальных очередей. Многопроцессорный планировщик/диспетчер с общей очередью имеет существенный недостаток, заключающийся в образовании задержек при назначении задач, возникающих из-за конфликтов при одновременном запросе множества процессоров единственного диспетчера [3, 6]. В планировщиках с индивидуальными очередями такое явление не наблюдается, т.к. у каждого процессора имеется собственная очередь задач и собственный диспетчер. Диспетчеризация заключается в назначении очередной задачи в локальный процессор и в переключении задач при их блокировке. Планировщик формирует очереди $1 \dots N$ и загружает новую задачу в одну из них по некоторому алгоритму, например, по критерию числа занятых мест. При переключениях контекста вследствие блокировки задача остается в той же очереди, в которой находилась ранее [3]. Такая модель осуществляет планирование только на уровне задач. Таким образом, уменьшаются накладные расходы по отношению к архитектуре ОС с общей очередью. Многопроцессорный планировщик, основанный на индивидуальных очередях, показан на рисунке 3. в виде модели массового обслуживания.

Отличие алгоритма планирования с индивидуальными очередями заключается в том, что в нем отсутствует процедура выбора свободного процессора [15], поэтому из графа автомата (рис. 2) изымается событие S_{SL}^{pj} . Соответственно из системы уравнений удаляется уравнение для этого события. Все остальные события и их связи равнозначны в обоих алгоритмах.

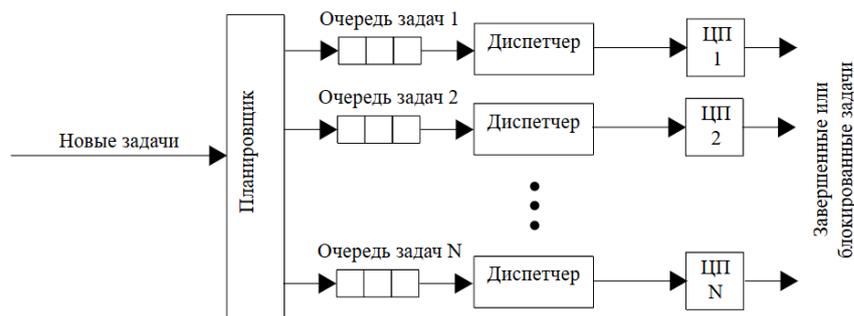


Рисунок 3 – Модель устройства планирования с индивидуальными очередями

Построение имитационных моделей. На основании представления алгоритмов планирования в виде графа недетерминированного автомата были построены соответствующие имитационные модели с использованием системы моделирования CPN Tools. Для построения имитационных моделей и проведения самого моделирования были использованы структурные и временные параметры, приближенные к параметрам CPB:

- число процессоров (процессорных ядер) в обеих моделях равно четырем;
- время обслуживания задачи процессором принято случайным и распределенным по экспоненциальному закону;
- на вход планировщика поступает пуассоновский поток задач с интенсивностью λ ;
- число мест общей очереди составляет 16, в каждой из индивидуальных очередей – 4.

Для упрощения в предлагаемой имитационной модели не были учтены временные задержки, связанные с сохранением и восстановлением контекстов, перезагрузкой таблицы адресов и с перезагрузкой кэш, возникающие в момент переключения задач. Эти параметры на данном этапе несущественны, т.к. основной целью моделирования является выбор базового алгоритма планирования, учитывающий только способ организации очереди задач.

Модель устройства планирования с общей очередью представлена на рисунке 4. Для ее создания, помимо стандартных, были добавлены следующие декларации:

- colset $INTi = INT\ timed$ – цвет для хранения индекса задачи;
- colset $CHECK = product\ INTi*INT*INT$ – цвет для хранения индекса задачи, времени поступления задачи и номера свободного процессора;
- colset $TIMECHECK = product\ INTi*INT$ – цвет для хранения индекса задачи, времени обработки задачи;
- colset $BTC = list\ TIMECHECK$ – цвет для хранения задач в виде списка;
- fun $GetTime() = IntInf.toInt(time())$ – функция для получения времени ответа системы.

Модель устройства планирования с общей очередью функционирует следующим образом. Запросы через канал ввода (*in*) поступают в хвост очереди задач (*buf*). Очередь организована по принципу буфера *FIFO* с числом мест равным 16. Обработка задач происходит в четырех процессорах (*CPU0*, *CPU1*, *CPU2*, *CPU3*) моделирующих обслуживание задач. Результат обработки помещается в выходной канал (*out*), предназначенный для выдачи результатов выполнения задач. Обслуживание задач в процессорах моделируется временной задержкой на случайное время, распределенное по экспоненциальному закону с заданным средним значением (математическим ожиданием).

Модель буфера задач, организованной по принципу *FIFO*, представлена на рисунке 5. При поступлении новой задачи с помощью перехода *in*

формируется сигнал запроса, включающий новую задачу в буфер, при наличии в нем свободного места. При отсутствии свободных мест позиций *Garbage collector* учитывают и утилизируют поступивший запрос. Учет ведется для определения степени уменьшения интенсивности входящих задач с целью устранения перегрузки процессоров. Выбор задачи на исполнение происходит из головы списка, если имеется хотя бы один свободный процессор и хотя бы одна задачи в очереди, для чего функция *select frame* выполняется с барьерной синхронизацией.

На рисунке 6 представлена модель одного процессорного узла (*CPU*). Поскольку модели других *CPU* одинаковы, то они включаются в устройство аналогично. Задача, взятая из головы буфера, направляется на обслуживание в свободный процессор, который изменяет флаг своего состояния на «занят». После обслуживания процессор выводит результат, изменяет флаг состояния на «свободен», и удаляет задачу из очереди [3].

В модели устройства с индивидуальными очередями (рис. 7) запросы задач поступают во входной канал (*in*), через выходной канал (*out*) выдаются результаты обслуживания в процессорных узлах. Задачи, готовые к обслуживанию, помещаются в четыре индивидуальные очереди (*buf0*, *buf1*, *buf2*, *buf3*), каждая с числом мест равным четырем, которые организованы по принципу буфера *FIFO*. Способ размещения задач определяется предварительным планировщиком (*planner*). В данной модели *planner* определяет наименее занятую очередь и помещает в неё вновь прибывшую задачу. Как и в модели с общей очередью, задачи обслуживаются в 4-х процессорных узлах *CPU0*, *CPU1*, *CPU2*, *CPU3*, с теми же параметрами.

В модели предварительного планировщика *planner*, представленной на рисунке 8, в случае поступления новой задачи переходом *in* проверяется наличие свободных мест в очередях *buf 0... buf 3*. При наличии свободных мест задача отправляется в тот узел, у которого наименьшее число занятых мест. При отсутствии свободных мест во всех очередях новая задача утилизируется позицией *Garbage collector* как и в модели с общей очередью задач.

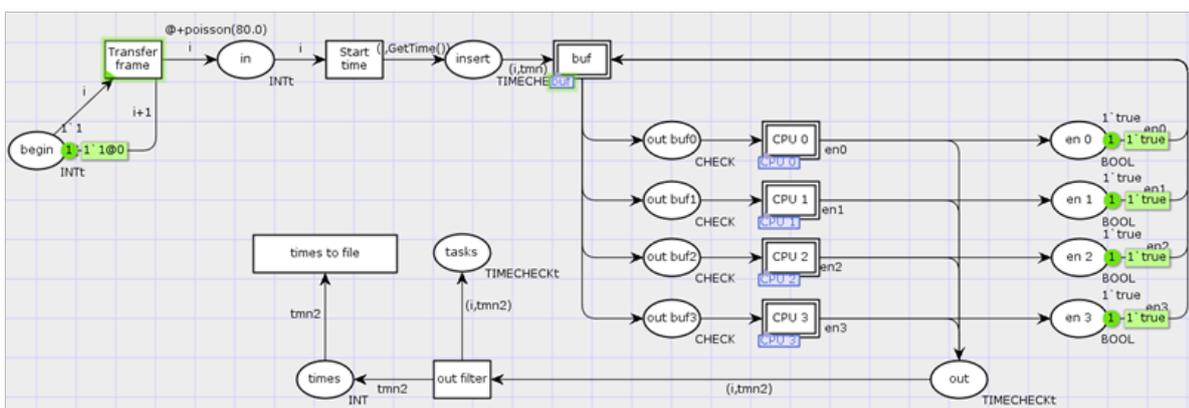


Рисунок 4 – Модель устройства планирования с общей очередью

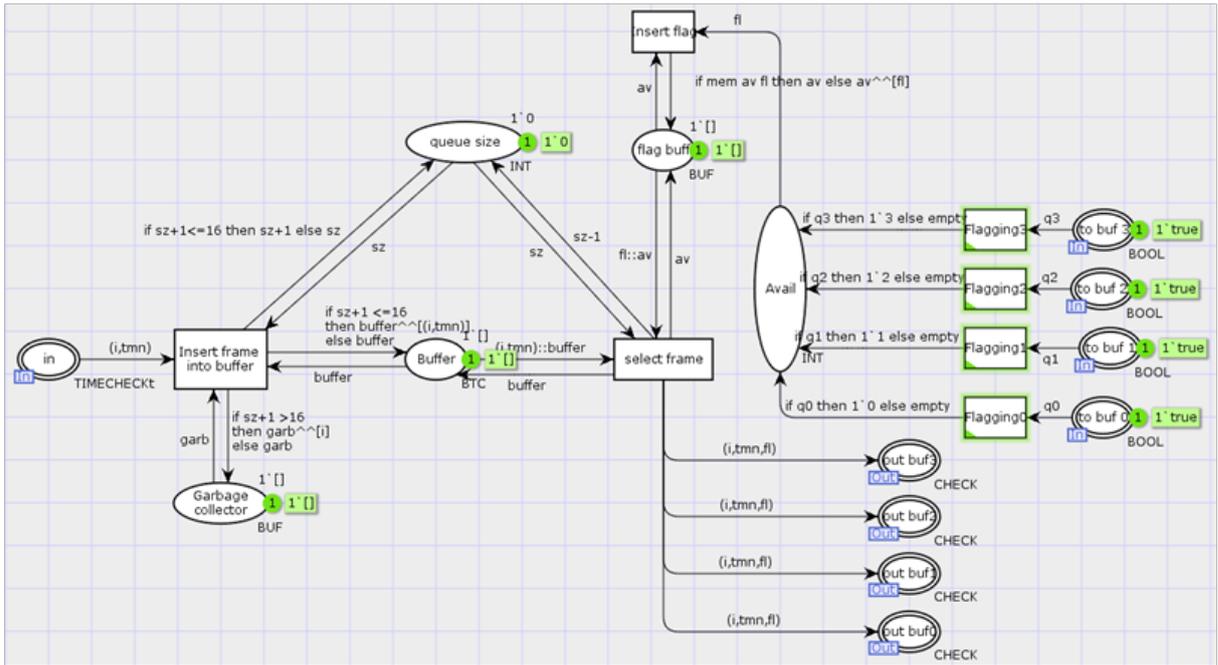


Рисунок 5 – Модель буфера задач с общей очередью

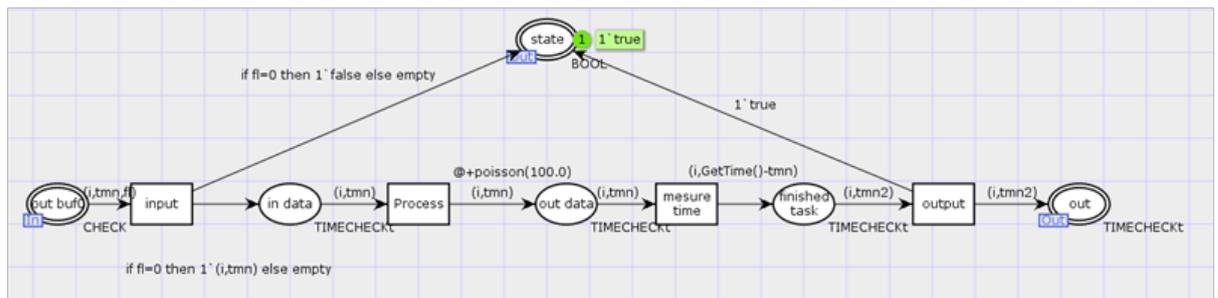


Рисунок 6 – Модель процессорного узла

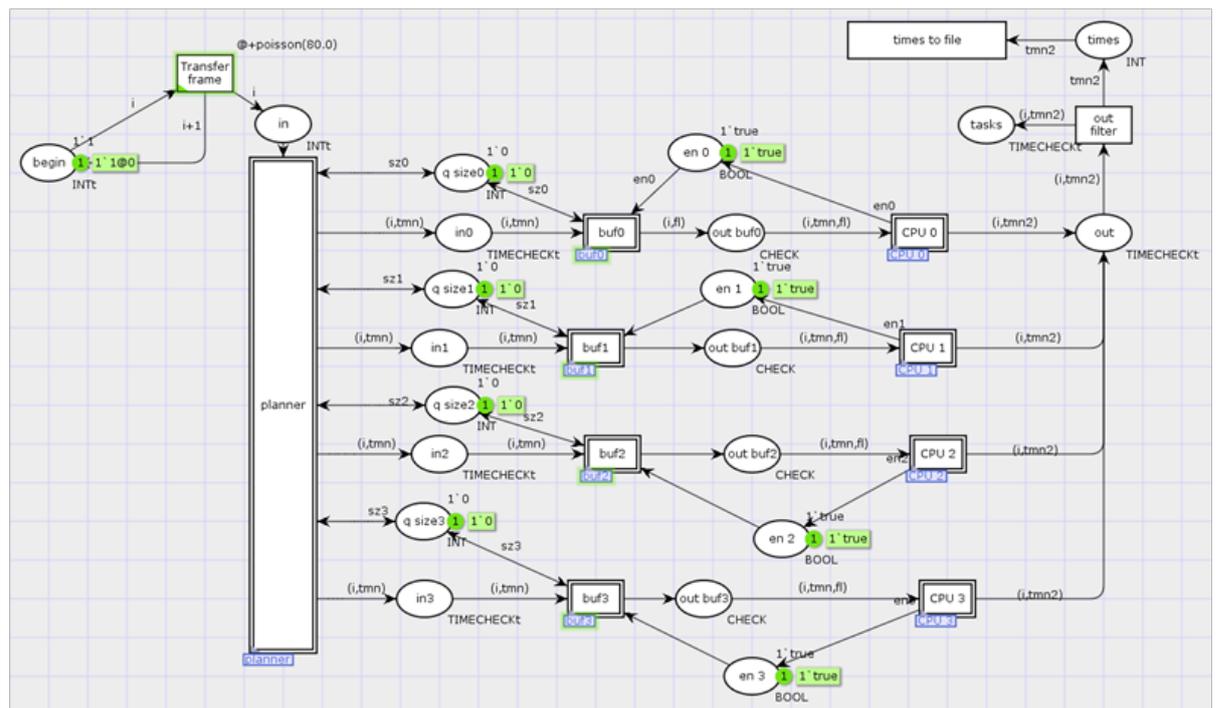


Рисунок 7 – Модель устройства планирования с индивидуальными очередями

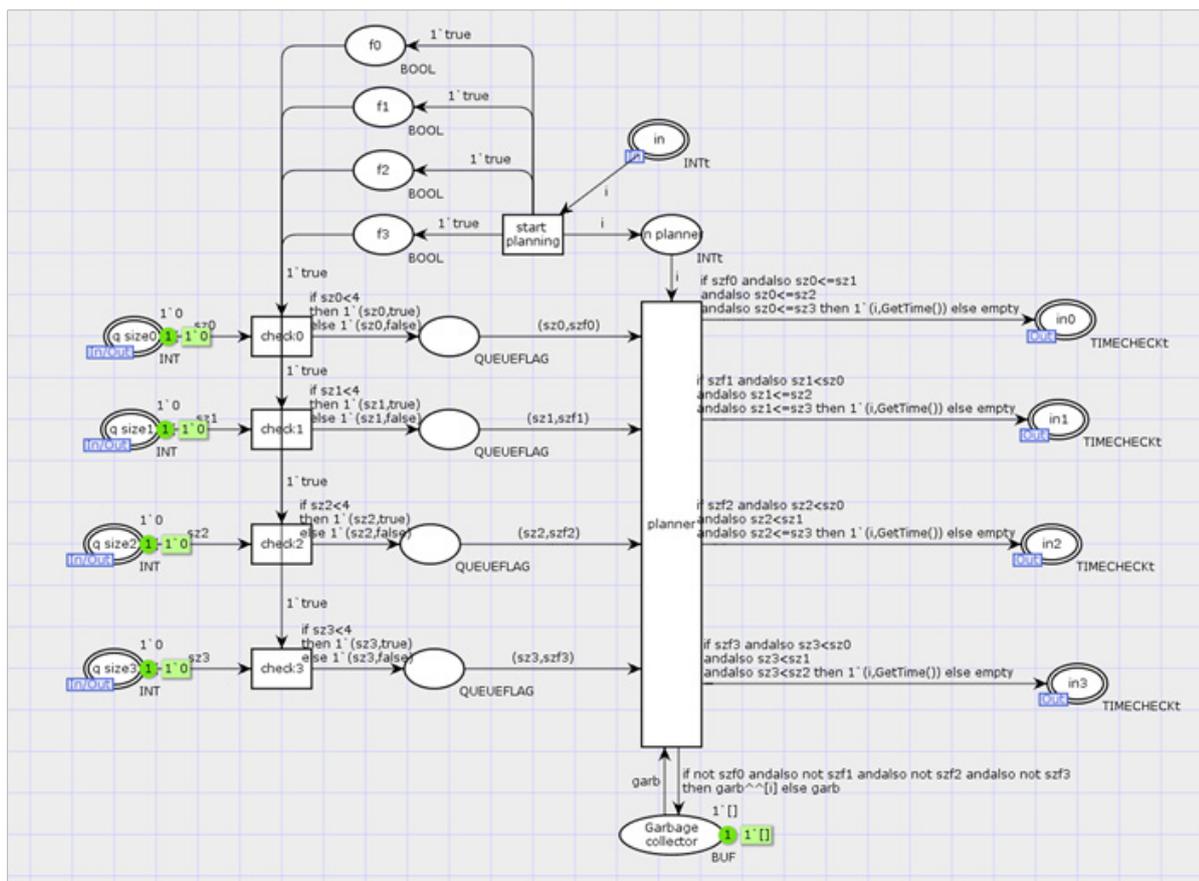


Рисунок 8 – Модель предварительного планировщика

Подсети, моделирующие работу индивидуальных очередей, идентичны.

Модель работы одной индивидуальной очереди представлена на рисунке 9. Если процессор очереди свободен, то задача выходит из буфера и отправляется на выполнение.

Модели узлов CPU с индивидуальной очередью одинаковы, поэтому на рисунке 10 представлен только одна из них. Задача, извлеченная из индивидуального буфера, поступает на обработку в

процессор этого же узла с установкой флага в состояние «занят». По окончании обслуживания флаг устанавливается в состояние «свободен», фиксируется результат обработки, после чего задача удаляется из очереди.

Результаты. С помощью средств симуляции CPN Tools было проведено сравнение среднего времени ответа T при разной интенсивности поступления задач (разной рабочей нагрузке) в многопроцессорную систему.

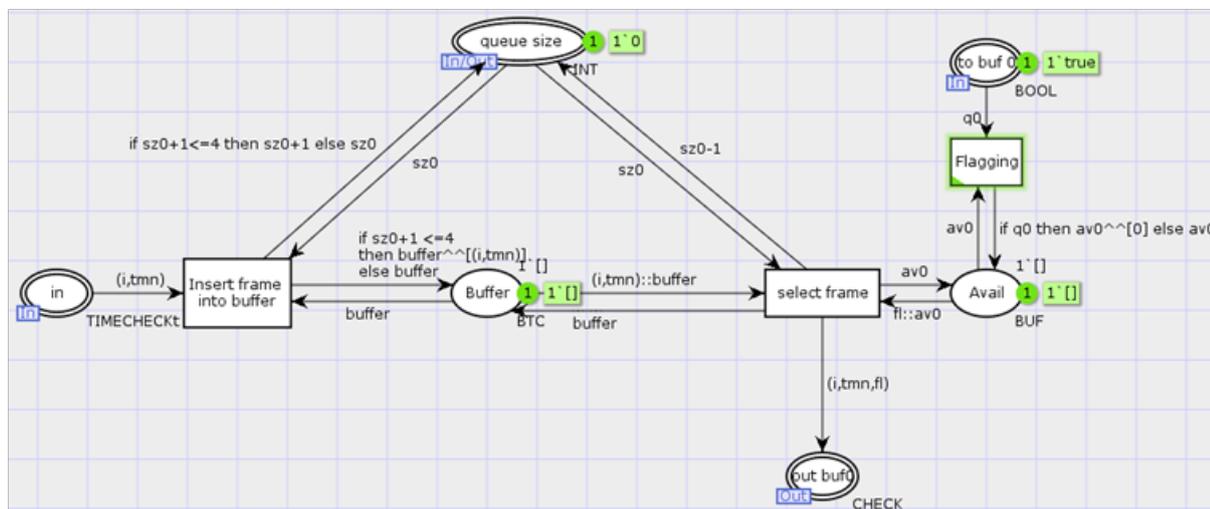


Рисунок 9 – Модель индивидуальной очереди

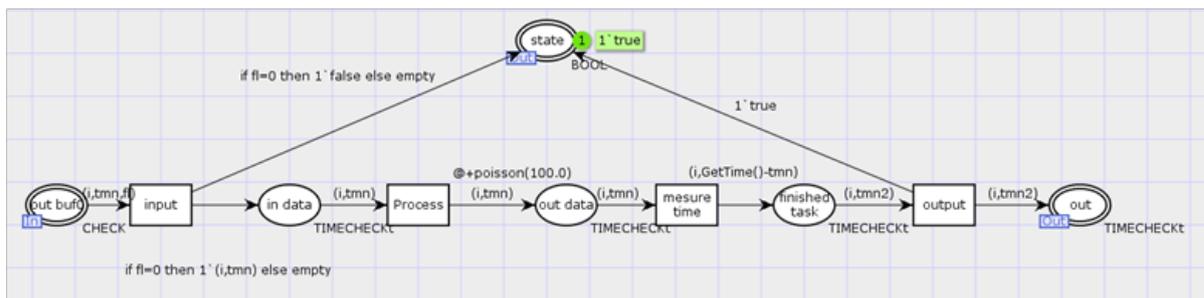


Рисунок 10 – Модель процессорного узла с индивидуальной очередью

Результаты исследований приведены в таблице 1. Для определенности принято, что число процессоров N в системе равно четырем, среднее время выполнения задачи в процессоре составляет $v = 95$ единиц времени. Средняя длительность интервалов t между поступающими на вход планировщика задачами варьировалась в пределах от 25 ед. времени до 80 ед. времени, что соответствует интенсивностям $\lambda = 1/t$ поступления задач от 0,0125 задач/ед. времени (низкая рабочая нагрузка) до 0,04 задач/ед. времени (высокая рабочая нагрузка). При этом загрузка процессоров $R = v/N$ составила 0,95 (высокая) и 0,296 (низкая). После проведения экспериментов было найдено среднее

время пребывания задачи в системе T , которое соответствует времени ответа многопроцессорной системы с той или иной подсистемой планирования.

Для наглядности результаты представлены в виде графиков зависимости времени ответа планировщика от интервалов между поступающими задачами t (рис. 11). Верхняя кривая соответствует модели с индивидуальными очередями, нижняя – модели с общей очередью.

По результатам исследований можно сделать вывод, что планировщик с общей очередью выполняет задачи быстрее, чем планировщик с локальными очередями при любом объеме рабочей нагрузки.

Таблица 1 – Результаты исследований

Средние значения интервалов поступления задач (ед. времени)	Модель с общей очередью	Модель с индивидуальными очередями
	T (ед. времени)	T (ед. времени)
25	209,6481051	245,6014074
30	117,5644761	169,4368475
32	108,35432	158,7487264
35	103,4191665	154,0489598
40	99,88494159	150,899688
55	95,6736539	142,2054731
70	95,55936	137,1189563
80	95,15682509	133,6622582

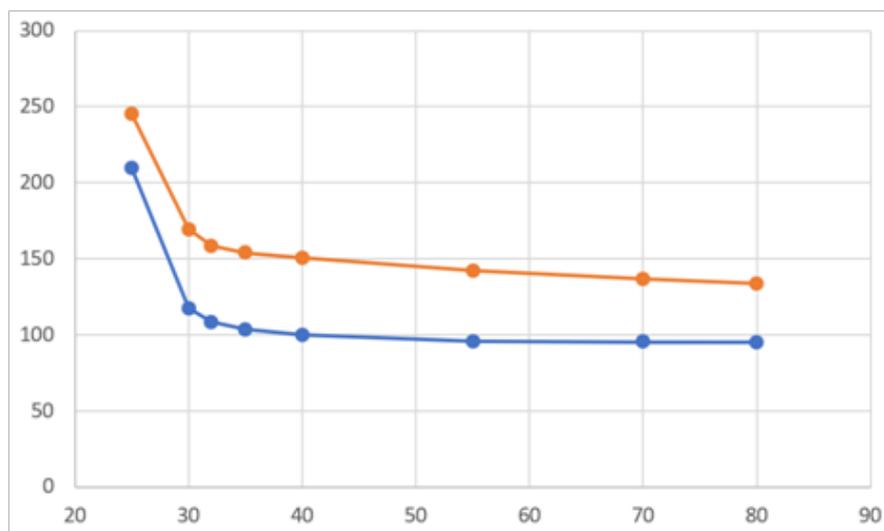


Рисунок 11 – Зависимости времени ответа планировщиков задач от интервалов времени между поступающими задачами

Обсуждение. Аналогичные результаты можно получить и другими способами, например, с помощью широко известного метода аналитического моделирования систем массового обслуживания. Как отмечено во введении, за базу для исследования был принят алгоритм, основанный на классической задаче «работа парикмахерской» [8, 9], обеспечивающий параллельную обработку по типу «клиент-сервер» на N процессорах. Фактически этот алгоритм описывает N -канальную систему массового обслуживания с ограничением очереди, которая относится по известной классификации Кендалла к $M/M/r/N$ -подобной ресурсной диспетчеризации, где r – длина очереди, N – количество обслуживающих устройств (процессоров) в марковской (*Markovian*) системе с пуассоновским распределением входящих заявок, экспоненциальным распределением длительностей обслуживания задач [9]. Задачи выполняются на N процессорах одновременно без результирующей агрегации исполненных заявок. Таким образом, алгоритм «спящий парикмахер» позволяет не только формально описать функционирование планировщика задач, но и оценить его характеристики производительности с помощью аппарата систем массового обслуживания (СМО), а в более сложных случаях – экспоненциальных стохастических сетей массового обслуживания (СеМО). Однако этот метод имеет ограничения, заключающийся в том, что:

1) отсутствует аналитическое выражение для описания N -канальной системы массового обслуживания с приоритетами;

2) хотя одноканальная приоритетная СМО описываются аналитически, но её использование в экспоненциальных СеМО недопустимо, т.к. она является немарковской. Выходной поток немарковской СМО формирует произвольный (не пуассоновский) поток заявок для последующих СМО, включенных в СеМО, что нарушает однородность потоков в сети. В результате не имеется возможности применения приоритетных СМО для моделирования многопроцессорных планировщиков задач жесткого реального времени, где алгоритмы планирования основаны на приоритетах.

Недостатки аналитического моделирования устраняются классическим имитационным моделированием систем массового обслуживания с использованием языков типа *GPSS* или других аналогичных языков [19]. Но указанные методы имеют общие недостатки – отсутствие наглядности и возможности трансформации модели в структуру проектируемой системы. Моделирование с использованием языков описания аппаратуры, например, *VHDL* [3, 15] с текстовым представлением структуры тестируемого устройства позволяет получить временные диаграммы и оценить внутренние временные задержки в автоматной модели. Однако оценки задержек в очередях таким

путем получить не удастся, потому что в языках данного типа отсутствуют стандартные средства измерения.

Метод сетей Петри основан на имитационном моделировании с помощью инструментальных средств, например, *CPN Tools*, который имеет широкие возможности представления моделей с очередями типа *FIFO* и типа *LIFO (Last In – First Out)*, приоритетных и бесприоритетных, а также получать характеристики производительности разрабатываемых моделей. Метод обладает наглядностью, т.к. моделирование производится на уровне структуры устройства. Кроме того, он позволяет достаточно легко трансформироваться в программу на языке описания аппаратуры и получить аппаратную реализацию устройства с верификацией работоспособности по временным диаграммам.

Выводы. Сравнение двух базовых алгоритмов планирования, основанных на общей и индивидуальных очередях, выполнено методом сетей Петри с использованием пакета имитационного моделирования *CPN Tools*. Показано, что алгоритм планирования с общей очередью на всем допустимом диапазоне изменения интенсивности входного потока задач имеет показатели производительности примерно на 17-50% выше, чем планировщик на основе индивидуальных очередей.

Таким образом, применение алгоритма, основанного на общей очереди, предпочтительнее при разработке устройства аппаратной поддержки функции планирования для многопроцессорных (многоядерных) операционных систем реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Kohútka, L. A New FPGA-Based Task Scheduler for Real-Time Systems / L. Kohútka, J. Mach // *Electronics*. – 2023. – №12. – P. 1870. [Электронный ресурс] Режим доступа URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12081870>.
2. Lange, A.B.; Andersen, K.H.; Schultz, U.P.; Sorensen, A.S. *HartOS – A Hardware Implemented RTOS for Hard Real-time Applications*. *FAC Proc.* 2012, Vol. 45, 207-213.
3. Волчихин, В.И. Планировщик задач с аппаратной поддержкой для многопроцессорных систем / В.И. Волчихин, Н.П. Вашкевич, Р.А. Бикташев // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2012. – №1 (21). – С. 12-20.
4. Бикташев Р.А. Разработка устройства планирования процессов для многопроцессорных систем/ Р.А.Бикташев, Н.П. Вашкевич, С.В.Киселев // В сборнике: *Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2016. Сборник трудов международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 томах. Рязанский государственный радиотехнический университет; Под общей редакцией О.В. Миловзорова*. 2016. – С. 304-308.
5. Derafshi, D.; Norollah, A.; Khosroanjani, M.; Beitollahi, H. *HRHS: A High-Performance Real-Time Hardware Scheduler*. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2020, 31, 897-908.
6. Вашкевич Н.П. Недетерминированные автоматы и их использование для реализации систем параллельной обработки информации / Н.П.Вашкевич, Р.А. Бикташев. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – 394с.
7. Таненбаум Э. *Современные операционные системы*. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2015. – 1120 с.
8. Бикташев Р.А., Структурная реализация и моделирование алгоритмов планирования/диспетчеризации

в параллельных системах на основе логики недетерминированных автоматов/ Р.А. Бикташев, Н.П. Вашкевич // В сборнике: Новые информационные технологии и системы. Сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Вычислительная техника» и 30-летию кафедры «Системы автоматизированного проектирования». 2017. – С. 12-17.

9. Бикташев Р.А. Модель управления процессами в многопроцессорных системах на основе стохастических сетей массового обслуживания // В сборнике: Новые информационные технологии и системы сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры «Вычислительная техника» и 30-летию кафедры «Системы автоматизированного проектирования». 2017. – С. 17-20.

10. K. Jensen, L.M. Kristensen and L. Wells, "Colored Petri Nets and CPN Tools for Modeling and Validation of Concurrent Systems," International Journal on Software Tools for Technology Transfer, Vol. 9, No. 2, 2007, pp. 213-254.

11. Эндриус Г.Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования: Пер.с англ.–М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 512с.

12. Механов В.Б., Коннов Н.Н., Кизилев Е.А. Построение сети Петри, моделирующей поведение недетерминированного конечного / автомата // Труды XIX Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2012». – СПб.: ИТМО, 2012.

13. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М: Мир, 1984. – 264 с.

14. Бикташев Р.А. Реализация аппаратного ядра многопроцессорной операционной системы. В сборнике: Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание – 2017 сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 67-69.

15. Бикташев Р.А., Емельянов Р.И. Структурная реализация и оценка временных характеристик многопроцессорных планировщиков с распределенной очередью задач. Вестник Пензенского государственного университета. – 2017. – № 3 (17). – С. 66-75.

16. Norollah, A.; Kazemi, Z.; Sayadi, N.; Beitollahi, H.; Fazeli, M.; Hely, D. Efficient Scheduling of Dependent Tasks in Many-Core Real-Time System Using a Hardware Scheduler. In Proceedings of the 2021 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC), Waltham, MA, USA, 20–24 September 2021; pp. 1-7.

17. Wulf, C.; Willig, M.; Goehringer, D. RTOS-Supported Low Power Scheduling of Periodic Hardware Tasks in Flash-Based FPGAs. Microprocess. Microsyst. 2022, 26, 104566.

18. Бикташев Р.А., Королев Б.Д., Алексеева А.А. Разработка и анализ характеристик приоритетных планировщиков задач для многопроцессорных операционных систем реального времени. В сборнике: Новые информационные технологии и системы. Сборник научных статей по материалам XVII Международной научно-технической. – 2020. – С. 103-108.

19. Томашевский В., Жданова Е. Имитационное моделирование в среде GPSS. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 621.382

EDN: NYELDE

**ВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ОБУЧАЕМЫХ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ
ПО АЛГОРИТМУ ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОШИБКИ, ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ
ИХ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 1753-0212

AuthorID: 506261

ORCID: 0000-0001-9674-2604

ResearcherID: GXM-8212-2022

ScopusID: 57208836904

УШЕНИНА Инна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова / улица Гагарина 1а/11, e-mail: ivl23@yandex.ru)

Аннотация. В настоящее время модели машинного обучения, в том числе нейросетевые, все чаще реализуются в виде встраиваемых систем, в частности, на базе ПЛИС типа программируемой вентиляционной матрицы. В некоторых приложениях, таких, как идентификация систем и отслеживание объектов, обучение нейронных сетей требуется выполнять в реальном времени, а значит, знание того, сколько времени займет одна итерация алгоритма обучения в масштабе шага дискретизации, требуется уже на ранних стадиях проектирования. В настоящей работе предложен подход к оценке временных характеристик реализуемых на ПЛИС нейронных сетей, основанный на знании их критических путей. Упрощенные временные модели нейронных сетей – их фрагменты, содержащие критические пути, могут быть быстро реализованы на ПЛИС с целью оценки максимально достижимой на данной ПЛИС тактовой частоты. В работе представлена методика создания временных моделей для архитектуры нейронной сети в виде массива вычислительных блоков, содержимое которых не зависит от размеров сети. Определены критические пути внутри вычислительных блоков и показано, что с помощью контролируемого размещения блоков на ПЛИС и конвейеризации соединений между блоками можно добиться максимальной тактовой частоты на уровне отдельного блока. Это позволяет положить в основу временных моделей критические пути внутри блоков и межблоковые соединения, содержащие несколько ступеней конвейера. Рассмотрен порядок перехода от функциональных схем этих моделей к их технологическим версиям, учитывающим особенности ресурсов и топологии конкретной ПЛИС путем конфигурирования нужных ресурсов кристалла. Используемая архитектура нейронной сети дает возможность определить критические пути, а предложенные упрощенные временные модели, конкретизированные для этой архитектуры, – оценить временные характеристики нейронной сети на ранних стадиях проектирования, сразу после выбора микросхемы ПЛИС.

Ключевые слова: нейронная сеть, обучение в реальном времени, ПЛИС, временная модель, временной анализ, последовательно-параллельная архитектура, вычислительный блок, общий блок, критический путь, конвейер.

**TIMING MODELS OF NEURAL NETWORKS TRAINED IN REAL TIME USING
THE BACKPROPAGATION ALGORITHM FOR SUPPORTING
THEIR HARDWARE IMPLEMENTATION**

© The Author(s) 2025

USHENINA Inna Vladimirovna, candidate of technical sciences,

associate professor of Programming Department

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: ivl23@yandex.ru)

Abstract. To date, machine learning models, including those based on neural networks, are increasingly implemented in hardware, particularly on FPGAs. In some applications, such as system identification or object tracking, neural networks need to be trained in real-time mode. Therefore, knowledge about the time required by a single iteration of the training algorithm and its relation to the sampling rate of a system is necessary in the early stages of the design. This work proposes an approach for evaluating the timing characteristics of neural networks being implemented on FPGAs, based on knowledge of their critical paths. Simplified timing models of neural networks, i.e., their parts containing critical paths, can be quickly implemented on a chosen FPGA and provide information about the maximum clock frequency achievable on that FPGA. This paper introduces the procedure for creating timing models of neural networks with the architecture organized as an array of computational blocks, the content of which does not depend on the network's size. After a brief description of the architecture, the critical paths within the computational blocks are identified. Then, for neural networks as a whole, the possibility of maintaining the maximum clock frequency at the level of a single computational block by supervised placement of computational blocks and pipelining the interconnections between them is proved. Given this proven possibility, the timing models are created based on the critical paths within the computational blocks and along the interconnections between them, which contain several stages of the pipeline. The conversion from

the functional circuits of these models to their technological counterparts is shown. After the conversion, which takes into account the logic resources and topology of the chosen FPGA, a timing model may be quickly implemented on the FPGA by simply connecting the used resources placed in its specified region. Therefore, the used neural network architecture enables the localization of critical paths, and the proposed simplified timing models, tailored to the architecture, allow for assessment of a neural network's timing characteristics at early stages of design, i.e., after choosing an FPGA.

Keywords: neural network, training in real-time mode, FPGA, timing model, timing analysis, series-parallel architecture, computational block, shared block, critical path, pipeline.

Для цитирования: Ушенина И.В. Временные модели нейронных сетей, обучаемых в реальном времени по алгоритму обратного распространения ошибки, для поддержки их аппаратной реализации / И.В. Ушенина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 98-106. – EDN: HYELDE.

Введение. Развертывание нейронных сетей в составе встраиваемых систем в настоящее время – один из трендов развития систем искусственного интеллекта и машинного обучения [1-4]. Часто требуется не только развертывание, но и обучение нейронной сети на аппаратном уровне. Особую группу составляют задачи, требующие обучения нейронных сетей в режиме реального времени, то есть обновления синаптических коэффициентов не позднее, чем за один или несколько шагов дискретизации. В эту группу входят задачи двух обширных классов: идентификации систем и отслеживания объектов. К задачам идентификации систем, требующим обучения в реальном времени, относятся, например, управление движением роботов, адаптивная обработка сигналов, создание цифровых двойников и др. [5, 6]. Задачи отслеживания объектов включают слежение за пешеходами и транспортные средства в автономном вождении, отслеживание жестов и др. [7-10].

Среди аппаратных платформ, используемых в настоящее время для развертывания и обучения нейронных сетей, в том числе в реальном времени, можно выделить специализированные интегральные схемы (ASIC) [8,9], а также графические процессоры, микроконтроллеры и ПЛИС архитектуры программируемых вентильных матриц FPGA (Field Programmable Gate Array) [2-4]. Преимущество последних состоит в доступности, возможности параллельных вычислений и возможности настройки вычислительной архитектуры за счет программирования соединений между ресурсами.

Сложность обучения нейронных сетей в реальном времени связана с ограниченной скоростью вычислений имеющихся платформ, где требуется завершить все необходимые операции строго за отведенное время. К этим операциям могут относиться не только развертывание и/или обучение нейронной сети, но и прием обучающих данных и их подготовка, а также интерпретация и использование результатов работы нейронной сети [5-8].

Проектирование устройства, содержащего обучаемую в реальном времени нейронную сеть, требует знания временных характеристик ее схемы, в первую очередь – критических путей и максимальной рабочей частоты. Основным инструментом анализа устройств, проектируемых на ПЛИС, позволяющим

получить такие характеристики, является статический временной анализ (STA) [10-12]. В ходе STA строится временная модель проектируемого устройства, которая уточняется после каждого этапа проектирования и приобретает наибольшую точность после размещения и трассировки проекта [11, 12]. Временная модель представляется в виде набора путей прохождения сигналов с выходов одних синхронных элементов (триггерных ступеней) до входов других, и для каждого из путей оценивается время его прохождения. При этом учитываются технологические параметры как синхронных элементов (время установления, время удержания, время появления выходного сигнала при поступлении фронта тактового сигнала), так и задержки комбинационных узлов и межсоединений на путях распространения сигналов, а также качество тактового сигнала и перекос синхронизации (Clock Skew) в разных областях кристалла. Кроме того принимаются во внимание диапазон рабочих температур и вариации напряжений питания [11, 12].

Задача разработки и использования временной модели может ставиться по-разному. Наиболее простым случаем является встраивание готового модуля нейронной сети (IP-модуля), созданного для конкретной ПЛИС, в более крупный проект на ней же. IP-модуль, оформленный после его реализации на ПЛИС, будет иметь известные и воспроизводимые временные характеристики, зависящие от его размещения и трассировки связей на определенном участке кристалла. Если в качестве IP-модуля оформляется исходное RTL-описание или результат синтеза для конкретной ПЛИС, временные характеристики будут известны лишь приблизительно, однако они могут послужить основой для оценки быстродействия модуля.

На ранних стадиях проектирования встраиваемой системы, когда ПЛИС только выбирается, и исходного описания нейронной сети и системы в целом может еще не быть, нужно оценить скоростные характеристики IP-модуля нейронной сети, а также бюджет времени, отводимого на вычисления в ней. Поскольку временные характеристики модуля еще не известны, оценка может быть произведена ориентировочно на основе предположений об используемых в проекте ресурсах

ПЛИС. Но такой подход не учитывает задержек, вносимых соединениями между ресурсами, тогда как эти задержки для ПЛИС могут составить до 70-80% суммарных задержек распространения сигналов [13]. Для решения задач подобного рода могут использоваться также анализаторы RTL-кода, встроенные в современные среды проектирования – от Intel или AMD. В работах [14-16] для оценки временных характеристик проекта предложены независимые анализаторы, использующие модели машинного обучения. Однако, для пользования этими инструментами необходимо RTL-описание устройства, которое даже в случае поведенческого стиля может отличаться от производителя к производителю. Структурный стиль тем более подразумевает явное указание ресурсов ПЛИС в описании, а значит, для каждой ПЛИС, участвующей в сравнении, нужно создать отдельное RTL-описание, то есть, проделать значительную часть работы по проектированию IP-модуля.

Таким образом, актуальной является задача быстрой и точной оценки временных характеристик нейронной сети, реализуемой на ПЛИС как отдельный проект или в составе встраиваемой системы, без необходимости реализовывать проект для каждого из сравниваемых вариантов.

Методология. В настоящей работе предложен подход, который позволяет на ранних стадиях проектирования оценить временные характеристики IP-модуля нейронной сети без разработки проекта или RTL-описания всей сети для выбранной ПЛИС, но учесть при этом задержки, вносимые не только логическими элементами, но и соединениями между ними. Подход может быть применен, если для IP-модуля определены критические пути. Подход основан на создании упрощенных временных моделей нейронных сетей, учитывающих их критические пути и особенности их реализации на ПЛИС. В данном случае подход применен и продемонстрирован для нейронной сети типа «многослойный перцептрон», обучаемой в реальном времени по алгоритму обратного распространения ошибки, которая на ПЛИС реализуется в виде последовательно-параллельной архитектуры [17].

Формирование временных моделей для нейронной сети с архитектурой [17] выполнено в следующем порядке:

- 1) определены критические пути внутри отдельных вычислительных блоков архитектуры;
- 2) оценено влияние возрастания размеров сети на снижение ее максимальной тактовой частоты F_{\max} , а также различные способы сохранения F_{\max} ;
- 3) составлены упрощенные временные модели, соответствующие критическим путям схемы нейронной сети, и показано соответствие этих моделей их технологическим версиям для конкретной ПЛИС. После реализации на ПЛИС технологических версий моделей можно получить значение F_{\max} .

Схема нейронной сети с настраиваемыми размерами описана на языке VHDL в структурном стиле [12], создание временных моделей выполнено методом STA [11]. Реализация IP-модуля нейронной сети выполнена на ПЛИС GW5AST [18] в среде Gowin FPGA Designer [19] с встроенным временным анализатором.

Результаты. Архитектура нейронной сети. В случае последовательного режима выполнения алгоритма обратного распространения [20] на каждой итерации алгоритма все указанные ниже необходимые вычисления, делятся на три этапа:

1) прямое распространение входных сигналов $x_{kj}^i(n)$ и их масштабирование синаптическими коэффициентами $w_{kj}^i(n)$, вычисление выходных сигналов нейронов $y_k^i(n)$ и их производных $\varphi_k^i(n)$, вычисление сигналов ошибок нейронов выходного слоя $e_k^L(n)$ (1-4);

2) обратное распространение ошибок и вычисление локальных градиентов нейронов $\delta_k^i(n)$ (5-6);

3) обновление синаптических коэффициентов.

В формулах (1-7) также используются обозначения: $v_k^i(n)$ – сумма взвешенных входных сигналов нейрона; $b_k^i(n)$ – смещение нейрона; $d_k^L(n)$ – требуемый сигнал нейрона выходного слоя; η – коэффициент, задающий скорость обучения; i, k, j – соответственно номер слоя, номер нейрона в слое и номер входного сигнала нейрона; K_i – количество нейронов в i -м слое; n – номер итерации (интервала дискретизации); K_0 – количество входных сигналов нейронной сети; L – количество слоев в сети.

$$v_k^i(n) = b_k^i(n) + \sum_{j=1}^{K_{i-1}} w_{kj}^i(n) \cdot x_{kj}^i(n) \quad (1)$$

$$y_k^i(n) = (1 + \exp(-v_k^i(n)))^{-1} \quad (2)$$

$$e_k^L(n) = d_k^L(n) - y_k^L(n) \quad (3)$$

$$\varphi_k^i(n) = y_k^i(n) \cdot (1 - y_k^i(n)) \quad (4)$$

$$\delta_k^L(n) = e_k^L(n) \cdot \varphi_k^L(n) \quad (5)$$

$$\delta_k^{i-1}(n) = \varphi_k^{i-1}(n) \cdot \sum_{k=1}^{K_i} \delta_k^i(n) \cdot w_{kj}^i(n) \quad (6)$$

$$w_{kj}^i(n+1) = w_{kj}^i(n) + \eta \cdot x_{kj}^i(n) \cdot \delta_k^i(n) \quad (7)$$

Приоритетом при разработке архитектуры была минимизация зависимости F_{\max} от размеров нейронной сети и количества ее входных сигналов. Этому способствовало представление архитектуры в виде массива вычислительных блоков (ВБ), схематически не зависящих от размеров сети и количества входных сигналов, а также минимизация объема комбинационной логики на критических путях [17]. В общем виде архитектура нейронной сети представлена на рисунке 1. Массив ВБ последовательно обслуживает слои нейронной сети, а значит, количество ВБ K определяется слоем нейронной сети с максимальным количеством нейронов. В состав архитектуры входит также общий блок (ОБ),

разделяемый всеми ВБ. Структурные схемы ВБ и ОБ представлены соответственно на рисунках 2 и 3.

ВБ массива на этапах 1 и 3 работают параллельно и независимо друг от друга, выполняя вычисления по формулам (1) и (7) соответственно с использованием умножителя, сумматоров и регистра-аккумулятора *Acc*. На этапе 1 $w_{kj}^i(n)$ извлекаются из блока памяти (*RAM*) и через мультиплексор *B* поступают на умножитель. На этапе 3 обновленные синаптические

коэффициенты $w_{kj}^i(n+1)$ сохраняются в *RAM*.

Блок φ в составе ОБ на этапе 1 последовательно вычисляет по (2) функции активации каждого нейрона. Одновременно с этим ОБ вычисляет $\Phi_k^i(n)$ по (4) и произведения $\eta \cdot x_{kj}^i(n)$, требуемые на этапе 3 (7). Результаты этих вычислений сохраняются в блоках памяти (*RAM*). При обслуживании нейронов последнего слоя за расчетом $y_k^L(n)$ и $\Phi_k^i(n)$ сразу следует расчет $e_k^L(n)$ и $\delta_k^L(n)$ согласно (3) и (5).

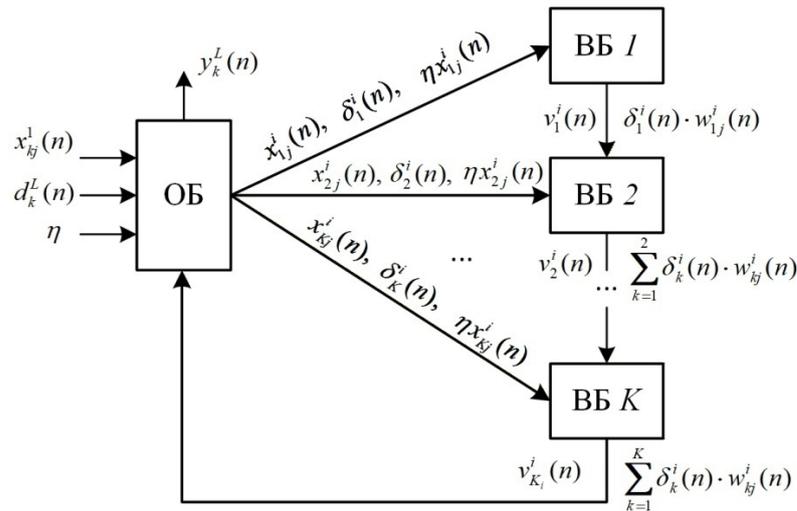


Рисунок 1 – Последовательно-параллельная архитектура нейронной сети

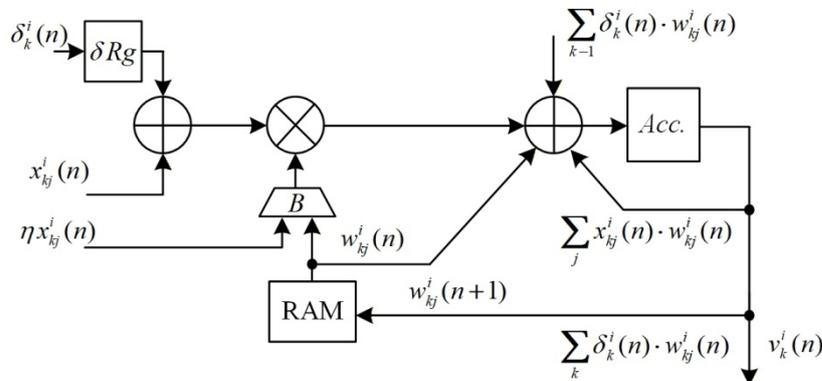


Рисунок 2 – Вычислительный блок (ВБ)

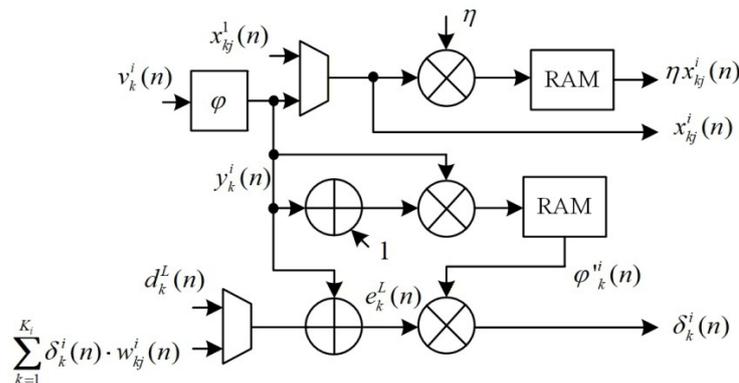


Рисунок 3 – Общий блок (ОБ)

Локальные градиенты нейронов скрытых слоев $\delta_k^{i-1}(n)$ вычисляются согласно (6) на втором этапе с участием ВБ, сумматоры которых образуют цепочку (рис. 1). Каждый k -й ВБ в цепочке вычисляет одно произведение $\delta_k^i(n) \cdot w_{kj}^i(n)$ и прибавляет его к уже накопленной сумме $k-1$ произведений, вычисленных предыдущими ВБ.

Расчитанные массивом ВБ суммы $\sum_{k=1}^{K_i} \delta_k^i(n) \cdot w_{kj}^i(n)$ поступают в ОБ, где умножаются на $\varphi^{i-1}(n)$, а готовые $\delta_k^{i-1}(n)$ передаются в регистры хранения локальных градиентов в составе ВБ – δRg . Сумматоры и умножители в ОБ и ВБ реализуются на блоках цифровой обработки сигналов (ЦОС) ПЛИС, а RAM – на блоках ОЗУ [18].

Определение критических путей внутри ВБ и ОБ. Удержание F_{max} на уровне отдельного вычислительного блока может быть достигнуто при учете топологии ПЛИС, временных характеристик ее логических ресурсов, а также предотвращения удлинения критических путей с увеличением размеров сети. Наилучшим можно считать результат реализации, когда при любом размере нейронной сети ее F_{max}

определяется критическим путем внутри ВБ или ОБ, который минимизирован всеми доступными методами. В [17] показано, что предложенная последовательно-параллельная архитектура позволяет остановить снижение F_{max} с ростом размеров нейронных сетей, однако в целом F_{max} невысока и составляет от 112 до 77 МГц при K от 3 до 240. Снижение F_{max} связано с удлинением критических путей, соответствующих соединениям между массивом ВБ и ОБ [17]. Однако, если эти критические пути конвейеризировать, F_{max} будут ограничивать уже критические пути внутри ВБ и ОБ.

В таблицах 1 и 2 показаны операции, выполняемые соответственно ВБ и ОБ с наибольшими задержками распространения t_d и соответствующие им F_{max} . Из таблиц следует, что в ОБ F_{max} составляет 113 МГц, и ограничивается вычислением $y_k^i(n)$ в блоке φ (рис. 3).

В ВБ F_{max} составляет 160 МГц, частота ограничивается временем чтения и пересылки синаптического коэффициента из блока памяти на умножитель (рис. 2).

Таблица 1 – Операции внутри ВБ с наибольшими задержками распространения сигналов t_d и ограничения на частоту тактового сигнала F_{max} , накладываемые этими операциями

Операция	t_d , нс	F_{max} , МГц
Чтение $w_{kj}^i(n)$ из RAM и его пересылка на умножитель через мультиплексор В	5,984	160
Чтение $w_{kj}^i(n)$ из RAM и его пересылка на сумматор	4,604	205
Чтение $w_{kj}^i(n+1)$ из регистра Асс и пересылка в RAM	4,152	247
Вычисление $w_{kj}^i(n+1)$ в блоке ЦОС	3,647	257
Вычисление $v_k^i(n)$ в блоке ЦОС; вычисление $\delta_k^i(n) \cdot w_{kj}^i(n)$ в блоке ЦОС	3,347	279

Таблица 2 – Операции внутри ОБ с наибольшими задержками распространения сигналов t_d и ограничения на частоту тактового сигнала F_{max} , накладываемые этими операциями

Операция	t_d , нс	F_{max} , МГц
Вычисление $y_k^i(n)$ в блоке φ	8,751	113
Чтение $\varphi_k^i(n)$ RAM и его пересылка на умножитель	4,295	223
Вычисление $\varphi_k^i(n)$ в блоке ЦОС; Вычисление $\delta_k^i(n)$ в блоке ЦОС	3,647	257
Вычисление $\eta \cdot x_{kj}^i(n)$ в блоке ЦОС; Вычисление $\varphi_k^i(n) \cdot \sum_j \delta_k^{i-1}(n) \cdot w_{kj}^{i-1}(n)$ в блоке ЦОС	3,138	281
Чтение $y_k^i(n)$ из регистра блока φ и его пересылка на умножитель блока ЦОС	2,93	317

Определим, до каких значений можно поднять F_{max} отдельных ВБ и ОБ при использовании архитектуры [17], ПЛИС [18] и метода вычисления функции активации [21]. По умолчанию проект, реализуемый на ПЛИС, размещается автоматически, то есть элементы ВБ и ОБ могут оказаться далеко друг от друга, что соответствует длинным критическим путям внутри этих блоков. Их сокращения можно достичь, ограничив площадь, занимаемую на кристалле ВБ и ОБ, и добиться тем самым повышения F_{max} , не вмешиваясь в схему проекта. Результаты размещения ВБ и ОБ на ограниченной площади кристалла показаны на рисунке 4.

Другой способ повышения F_{max} – конвейеризация критических путей внутри ВБ и ОБ. Внутри ВБ конвейеризирующие регистры установлены между блоком RAM и мультиплексором В (рис. 2), так как

время чтения ОЗУ (1,781 нс) больше, чем сумма задержки, вносимой мультиплексором В (0,4 нс), и времени установления входного регистра умножителя (0,194 нс). Внутри ОБ возможности конвейеризации ограничены, так как при вычислении функции активации используются макросы LUT8, неделимые на уровне структурного HDL-описания [21]. Таким образом, конвейеризирующие регистры установлены там, где это позволяют используемые макросы, и дальнейшая конвейеризация невозможна.

Наконец, третья возможность повысить F_{max} – это выбрать максимальный класс скорости из доступных для выбранной ПЛИС. Для ПЛИС GW5AST [18] предусмотрено два класса скорости – «slow» и «fast».

В таблицах 3 и 4 представлены результаты размещения ВБ и ОБ на ПЛИС двух классов скорости при использовании перечисленных выше

мер повышения производительности в различных комбинациях. Из таблиц следует, что использование ПЛИС класса скорости «fast» дает преимущество в производительности в среднем около 25%. Совместное использование конвейеризации критического пути внутри ОБ и его размещения на ограниченной площади кристалла дает повышение F_{max} со 113 до 193 МГц, и эта величина в силу указанных выше причин является пределом. Из

таблицы 4 можно заключить, что ВБ массива достаточно размещать на отведенных для них участках кристалла, чтобы достичь предела F_{max} , найденного выше для ОБ.

Таким образом, F_{max} отдельно взятых ВБ и ОБ составляет 193 МГц и обеспечивается выбором ПЛИС класса скорости «fast», размещением ВБ и ОБ на ограниченной площади кристалла и конвейеризацией критического пути внутри ОБ.



Рисунок 4 – Размещение ВБ (слева) и ОБ (справа) на ограниченной площади кристалла. Занятые ресурсы ПЛИС выделены. Программируемая логика находится между рядами блоков ЦОС и ОЗУ

Таблица 3 – Максимальная тактовая частота F_{max} (МГц) вычисления функции активации при его выполнении на ПЛИС двух классов скорости и различных комбинациях мер повышения производительности

Класс скорости ПЛИС	Автоматическое размещение, конвейеризации нет	Размещение на ограниченной площади, конвейеризации нет	Автоматическое размещение и конвейеризация	Размещение на ограниченной площади и конвейеризация
Fast	113	153	168	193
Slow	100	123	135	154

Таблица 4 – Максимальная тактовая частота F_{max} (МГц) пересылки синаптического коэффициента из блока памяти в умножитель ВБ при ее выполнении на ПЛИС двух классов скорости и различных комбинациях мер повышения производительности

Класс скорости ПЛИС	Автоматическое размещение, конвейеризации нет	Размещение на ограниченной площади, конвейеризации нет	Автоматическое размещение и конвейеризация	Размещение на ограниченной площади и конвейеризация
Fast	160	199	206	265
Slow	128	137	165	212

Сохранение максимальной тактовой частоты нейронной сети при возрастании ее размеров. При переходе от отдельных ВБ и ОБ к архитектуре в целом состав вычислительных блоков не меняется, и задача сохранения производительности сводится к компенсации удлинения критических путей, проходящих по соединениям между ВБ и ОБ. В [17] показано, что с возрастанием размеров нейронных сетей задержки по всем шинам, соединяющим массив ВБ с ОБ, увеличиваются соразмерно, и при возрастании K с 3 до 240 возрастают с 3,7 нс до 13 нс соответственно. При этом согласно таблице 3 для удержания F_{max} на уровне ОБ необходимо, чтобы сигналы распространялись между ОБ и ВБ не более чем за 5,2 нс. С учетом этого требования, а также с целью предотвращения роста коэффициентов разветвления, для передачи сигналов от ОБ к ВБ использована древовидная конвейеризирующая структура соеди-

нений с латентностью распространения сигналов от ОБ к ВБ, равной четырем тактам (рис. 5). Сигналы ОБ от регистров из центра кристалла передаются на четыре равноудаленные от него точки $A1, B1, C1, D1$, затем от них – еще на четыре равноудаленные от центра точки $A2, B2, C2, D2$. Далее от точек $A2... D2$ сигналы поступают на четыре равноудаленные от них точки (например, для точки $A2$ – на AA, AB, AC, AD). Из каждой точки $AA, ..., DD$ сигналы попадают на входные регистры пятнадцати ВБ с задержкой, не превышающей 3 нс. Задержки распространения по остальным «ветвям дерева» приведены в таблице 5. Для сравнения в таблице 5 представлены задержки распространения сигналов по этой же структуре, но при отсутствии на кристалле размещенного массива ВБ. Полученные значения t_d отличаются не более чем на 20%, и с запасом укладываются в диапазон до 5,2 нс.

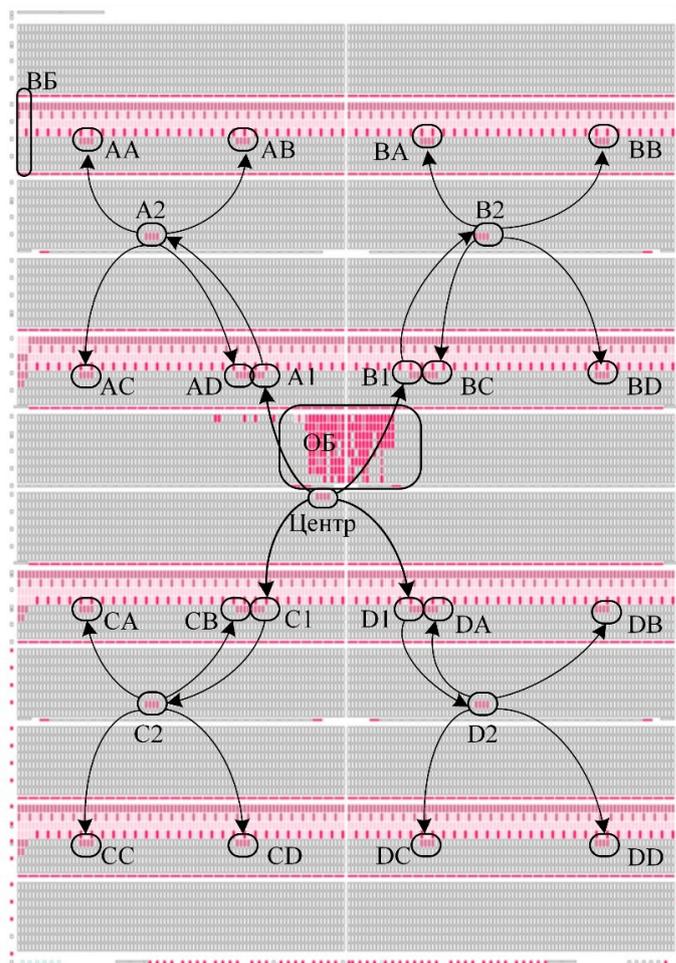


Рисунок 5 – Схема конвейеризации сигналов, передаваемых от ОБ к ВБ, при $K = 240$

Таблица 5 – Время t_d распространения сигналов по ступеням конвейера

Ступень конвейера	Об – центр	Центр – A1 (B1, C1, D1)	A1 (B1, C1, D1) – A2 (B2, C2, D2)	A2 – AA ... D2 – DD
$t_{p, \text{нс}}$, нс, без массива ВБ	3,434 – 1,941	4,328 – 1,773	2,312 – 1,485	5,213 – 1,397
$t_{p, \text{нс}}$, нс, с массивом ВБ	3,551 – 2,199	4,433 – 1,701	2,791 – 1,602	5,191 – 1,454

Упрощенные временные модели нейронной сети и их технологические версии. Так как F_{max} определяется критическими путями в ОБ и ВБ, их состав не зависит от размеров нейронных сетей, а связи между блоками могут конвейеризироваться до уровня F_{max} отдельного ОБ, то для оценки значений F_{max} , достижимых на различных ПЛИС, можно использовать упрощенные временные модели. Они позволяют в ходе оценки реализовывать на ПЛИС не всю сеть, а только малые части ВБ и ОБ, соответствующие их критическим путям. Оценка при этом выполняется в три этапа.

1. Для критических путей составляются упрощенные временные модели в терминах STA. То есть, пути сигналов в моделях должны начинаться от выходов синхронных элементов, возможно, проходить через комбинационную логику и заканчиваться на входах других синхронных элементов. При этом из временной модели, которая является, по сути, функциональной схемой, можно уточнить, на каких ресурсах ПЛИС она может быть реализована.

2. Среди ресурсов ПЛИС отбираются те, что

понадобятся для реализации упрощенной модели, и из них составляется технологическая версия модели.

3. Составленная технологическая версия реализуется на ПЛИС, и для нее выполняется статический временной анализ, дающий значение F_{max} . При этом, поскольку выполнены размещение и трассировка модели, оценка F_{max} будет учитывать задержки распространения сигналов, вносимые не только логикой, но и соединениями.

В таблице 6 приведены упрощенные временные модели, соответствующие критическим путям внутри ОБ и ВБ, а также их технологические версии для ПЛИС [18]. Обозначения элементов на схемах временных моделей соответствуют рисункам 2 и 3, на их технологических версиях – совпадают с названиями макросов, имеющихся у ПЛИС [18]. Критические пути показаны жирными линиями, начало и окончание каждого из них отмечены точками. Наименованиями $Rg10$, $Rg8$ и Rg обозначены 10-, 8- и 1-разрядные регистры, элемент $LUT10$ – 10-разрядная таблица истинности,

реализующая вычисление одного разряда $y_k^i(n)$ методом поразрядного отображения [21]. LUT10 на ПЛИС реализуется с помощью макросов LUT8 и MUX4, между которыми при конвейеризации уста-навливается регистр (макрос dff). Для ВБ в

таблице 6 показана модель, соответствующая пути синаптического коэффициента, считанного из блока памяти (RAM), через мультиплексор B до входного регистра умножителя. Модель ступени конвейера представляет собой соединение двух регистров.

Таблица 6 – Упрощенные временные модели нейронной сети и их технологические версии для ПЛИС [18]

Временная модель	Технологическая версия
<p>1. Критический путь в ОБ (блоке φ) без конвейеризации</p>	
<p>2. Критический путь в ОБ (блоке φ) с конвейеризацией</p>	
<p>3. Критический путь в ВБ</p>	
<p>4. Критический путь, соответствующий ступени конвейера между ОБ и ВБ (пример)</p>	

Обсуждение. Благодаря тому, что архитектура нейронной сети представляет собой массив вычислительных блоков, размер и состав которых не зависят от размеров реализуемых нейронных сетей, возможно раздельное моделирование вычислительных блоков и конвейеризированных соединений между ОБ и массивом ВБ.

В таблице 6 показаны временные модели, основанные на критических путях, обнаруженных при реализации на ПЛИС определенной топологии,

где ряды блоков ОЗУ и ЦОС разделены массивами программируемой логики. Такая топология является типичной, однако, если выбранная для оценки ПЛИС имеет другое расположение ресурсов, желательно составить модели для нескольких потенциальных критических путей – например, как показано в таблицах 2 и 3.

Результаты оценки F_{max} с помощью технологических версий временных моделей могут зависеть также от загруженности кристалла – чем больше

ресурсов и программируемых соединений занято, тем сложнее может быть трассировка и длиннее критический путь. Однако оценка F_{max} на полностью свободном кристалле дает представление о наилучших результатах, достижимых на нем.

Возможность распространения данного подхода на другие архитектуры нейронных сетей и вычислительные структуры вообще зависит от нескольких факторов, в частности:

1) можно ли выделить в реализуемой структуре отдельные повторяющиеся блоки, конвейеризировать связи между ними и локализовать критические пути внутри блоков;

2) сколько в структуре потенциальных критических путей разного рода, и насколько они близки друг к другу по временным задержкам. Также, для выявления критических путей и формирования упрощенных временных моделей вычислительной структуры желательна ее реализация хотя бы на одной ПЛИС, имеющей типовое расположение ресурсов.

Выводы. В статье предложен подход к оценке временных характеристик нейронных сетей с последовательно-параллельной архитектурой, обучающихся в реальном времени, на ранних стадиях их реализации на ПЛИС. Предложенный подход заключается в реализации на ПЛИС технологических версий упрощенных временных моделей, соответствующих критическим путям вычислительных блоков в составе архитектуры. Данный подход позволяет на ранних стадиях проектирования нейронной сети на ПЛИС оценить ее максимальную тактовую частоту работы и распределение бюджета времени шага дискретизации встраиваемой системы в целом.

Преимуществом данного подхода является то, что он не требует реализации на конкретной ПЛИС и даже исходных RTL-описаний всей архитектуры нейронной сети, достаточно лишь описания и реализации ее упрощенных моделей. При этом, в отличие от раннего оценивания проектов на основе их RTL-описаний, предложенный подход позволяет учитывать конкретные задержки распространения по программируемым соединениям, так как они уже известны в результате реализации технологических версий моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Reddi V.J. Introduction to Machine Learning Systems. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.mlsysbook.ai/> (дата обращения 15.10.2025).
2. Zhang Z., Li J. A Review of Artificial Intelligence in Embedded Systems // *Micromachines*. – 2023. – Vol. 14. – No. 5. – P. 897.
3. Seng K.P., Ang L.M. Embedded Intelligence: State-of-the-Art and Research Challenges // *IEEE Access*. – Vol. 10. – 2022. – P. 59236-59258.
4. Seng K.P., Lee P.J., Ang L.M. Embedded intelligence on FPGA: Survey, Applications and Challenges // *Electronics*. – Vol. 10. – No. 8. – 2021. – P. 895.
5. Nelles O. Nonlinear System Identification: from Classical Approaches to Neural Networks, Fuzzy Models, and Gaussian Processes. – 2nd edition. – Springer Nature, 2020. – 1225 p.

6. Zhao G., Zhang P., Ma G., Xiao W. System identification of the nonlinear residual errors of an industrial robot using massive measurements // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2019. – Vol. 59. – P. 104-114.

7. Heidaryan M., Karimi G. FPGA Implementation of Two Multilayer Perceptron Neural Network in Cascade for Efficient Real Time Hand Gestures Tracking // *Microprocessors and Microsystems*. – Vol. 100. – 2023. – P.104849.

8. Han D., Lee J., Lee J., Choi S., Yoo H.-J. A 141.4 mW Low-Power Online Deep Neural Network Training Processor for Real-Time Object Tracking in Mobile Devices // *The 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Florence, Italy. 2018. – P. 1-5.

9. Han D., Yoo H.J. On-Chip Training NPU-Algorithm, Architecture and SoC Design. – Springer, 2023. – 234 p.

10. Pearce H., Yang X., Roop P.S., Katzev M., Strom T.B. Designing neural networks for real-time systems // *IEEE Embedded Systems Letters*. 2021. – Vol. 13. – No. 3. – P. 94-97.

11. Bhasker J., Chadha R. Static Timing Analysis for Nanometer Designs: A Practical Approach. – Springer Science & Business Media, 2009. – 572 p.

12. Ушенина И.В. Проектирование цифровых устройств на ПЛИС. – СПб.: Лань. – 2022. – 419 с.

13. Pangracious V., Marrakchi Z., Mehrez H. Three-Dimensional Design Methodologies for Tree-based FPGA Architecture. – Springer International Publishing, 2015. – 226 p.

14. Lv W., Xia Y., Chen X., Kuang L. ViTAD: Timing Violation-Aware Debugging of RTL Code using Large Language Models // *arXiv preprint*. – 2025. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://arxiv.org/pdf/2508.13257v1> (дата обращения 15.10.2025).

15. Amik F.R., Safari Y., Zhang Z., Vaisband B. Graph-Based Timing Prediction at Early-Stage RTL Using Large Language Model // *The 30th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASPDAC'25)*, 2025. – P. 393-400.

16. Fang W., Liu S., Zhang H., Xie Z. Annotating Slack Directly on Your Verilog: Fine-Grained RTL Timing Evaluation for Early Optimization // *The 61st ACM/IEEE Design Automation Conference*, 2024. – P. 1-6.

17. Ушенина И.В. Последовательно-параллельная архитектура для реализации на ПЛИС нейронных сетей, обучаемых в реальном времени по алгоритму обратного распространения ошибки // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2026. – №1 [в печати].

18. GWSAST series of FPGA Products. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://cdn.gowinsemi.com.cn/DS1104E.pdf> (дата обращения 15.10.2025).

19. Gowin EDA. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: https://www.gowinsemi.com/en/support/download_eda (дата обращения 15.10.2025).

20. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 1104 с.

21. Ушенина И.В. Реализация на современных ПЛИС вычислителя сигмоидной функции активации нейронных сетей табличным методом // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2024. – № 69. – С. 124-133.

**Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда и Пензенской области
№ 24-21-20100, <https://rscf.ru/project/24-21-20100/>**

Статья поступила в редакцию 15.11.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 004.9

EDN: HOOLPZ

**АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРАВИЛ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ИЗ ТЕКСТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8845-6757

AuthorID: 736248

ORCID: 0000-0002-1418-2226

ResearcherID: G-2175-2014

ScopusID: 57195617505

ГОЛОВНИН Олег Константинович, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой медицинской физики, математики и информатики
Самарский государственный медицинский университет
(443099, Россия, Самара, ул. Чапаевская, 89, e-mail: golovnin@bk.ru)

SPIN: 3719-1868

AuthorID: 1097227

ORCID: 0000-0002-1345-2562

ЧЕКИНА Елена Владимировна, ассистент кафедры медицинской физики, математики и информатики
Самарский государственный медицинский университет
(443099, Россия, Самара, ул. Чапаевская, 89, e-mail: ev-chekina@yandex.ru)

SPIN: 7824-9220

AuthorID: 1310360

ORCID: 0009-0007-1350-9112

ШЕСТАКОВА Мария Владимировна, аналитик управления проектно-аналитической
и инновационной деятельности
ООО «Открытый код»

(443001, Россия, Самара, ул. Ярмарочная, 55, e-mail: mariaromanenko42494@gmail.com)

Аннотация. В статье предложен алгоритм извлечения атрибутов (именованных сущностей) из текстов нормативных технических стандартов дорожной отрасли для формализации правил применения технических средств организации дорожного движения. Алгоритм основан на последовательном применении больших языковых моделей для обработки текста в соответствии с графом опроса, определяющим порядок извлечения атрибутов. Извлекаемые атрибуты используются для записи правил применения технических средств организации дорожного движения в форме продукций, предназначенных для реализации информационной поддержки в системах автоматизированного проектирования организации дорожного движения. Выполнена программная реализация предложенного алгоритма на основе библиотек подпрограмм для текстопонимания и текстогенерации. Функциональные возможности разработанного программного средства позволяют выполнить оптическое распознавание машинопечатного текста в нормативных технических документах и сформировать формализованные правила размещения дорожных знаков, разметки, светофоров и других технических средств организации дорожного движения. На основе сформированной базы знаний могут решаться различные практические задачи транспортно-инфраструктурного проектирования. Разработанное программное средство апробировано на текстах государственных стандартов при анализе типовых схем организации дорожного движения, что показало практическую применимость решения. Результаты, полученные в статье, могут быть полезны инженерам-проектировщикам и специалистам, ответственным за контроль соблюдения действующих нормативов в сфере дорожного движения.

Ключевые слова: организация дорожного движения, неструктурированные данные, текстопонимание, именованная сущность, интеллектуальный анализ данных, интеллектуальный анализ знаний, большая языковая модель, поисково-дополненная генерация, распознавание именованных сущностей.

**ALGORITHM FOR EXTRACTING RULES FROM TECHNICAL STANDARDS
IN ROAD TRAFFIC ORGANIZATION**

© The Author(s) 2025

GOLOVNIIN Oleg Konstantinovich, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Medical Physics, Mathematics, and Computer Science
Samara State Medical University

(443099, Russia, Samara, street Chapaevskaya 89, e-mail: golovnin@bk.ru)

CHEKINA Elena Vladimirovna, assistant at the Department of Medical Physics,
Mathematics and Computer Science
Samara State Medical University

(443099, Russia, Samara, street Chapaevskaya 89, e-mail: ev-chekina@yandex.ru)

SHESTAKOVA Maria Vladimirovna, analyst at the Department of Project Analysis and Innovation Management
SEC "Open Code"

(443001, Russia, Samara, street Yarmarochnaya 55, e-mail: mariaromanenko42494@gmail.com)

Abstract. This article proposes an algorithm for extracting attributes (named entities) from the texts of regulatory technical standards for the road industry to formalize rules for the use of technical means of traffic management. The algorithm is based on the sequential application of large language models for text processing in accordance with a query graph defining the order of attribute extraction. The extracted attributes are used to record rules for the use of technical means of traffic management in the form of products intended for the implementation of information support in automated traffic management design systems. A software implementation of the proposed algorithm is based on libraries of subroutines for text understanding and text generation. The functionality of the developed software enables optical recognition of machine-printed text in regulatory technical documents and the generation of formalized rules for the placement of road signs, markings, traffic lights, and other technical means of traffic management. The resulting knowledge base can be used to solve various practical problems in transport and infrastructure design. The developed software was tested using state standards texts to analyze typical traffic management schemes, demonstrating the solution's practical applicability. The results obtained in this article may be useful to design engineers and specialists responsible for monitoring compliance with current traffic regulations.

Keywords: traffic management, unstructured data, text understanding, named entity, data mining, knowledge mining, LLM, RAG, NER.

Для цитирования: Головнин О.К. Проектирование машиностроительного производства будущего: дорожная карта перехода от Индустрии 3.0 к Индустрии 5.0 / О.К. Головнин, Е.В. Чекина, М.В. Шестакова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 107-113. – EDN: HOOLPZ.

Введение. В современном мире цифровизация сферы транспортной инфраструктуры требует эффективной обработки и анализа большого объема нормативной технической документации. Национальные и отраслевые стандарты определяют правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров и других технических средств организации дорожного движения. Проверка и использование требований выполняется вручную или с минимальной автоматизацией, что сопровождается высокой трудоемкостью и риском возникновения ошибок [1].

Для автоматизации обработки и анализа нормативных документов применяются технологии обработки естественного языка, позволяющие извлекать структурированные термины и требования из текстов стандартов [2]. Сложности в извлечении возникают из-за отсутствия четкой структуры документов и частого противоречия между требованиями. Современные подходы стремятся преодолеть эти ограничения за счет методов на основе алгоритмов глубокого обучения для семантического анализа текста, что позволяет не только выявлять ключевые требования, но и устанавливать логические связи между ними [3, 4].

Использование технологии больших языковых моделей (LLM) и поисково-дополненной генерации (RAG) позволяет реализовать контекстный поиск и экспертизу проектной документации на основании информации из специализированных доменов знаний [5]. Извлечение информации из текстов может осуществляться на основе комбинации онтологии предметной области и нейросетевых методов анализа текста с использованием LLM [6, 7], однако такие решения требуют предварительной

существенной работы по созданию первичной онтологии. В [8] проведена оценка различных методов извлечения требований из документов стандартов, которая показала, что комбинирование различных методов позволит добиться наилучших результатов.

В [9] предложена структура, использующая методы тематического моделирования для извлечения информации из неструктурированных судебных решений, что позволило решить одну практическую задачу – оценить сходство решений. При этом неструктурированные документы требовали существенной предварительной обработки. Большинство современных методов требуют, чтобы специалист аннотировал и предоставлял полезные данные для обучения модели, поскольку именно маркировка человеком обеспечивает лучшие результаты, однако появляются и альтернативные стратегии, в том числе, на основе человеко-машинного взаимодействия, которые могут обеспечить схожие оценки моделей при меньших затратах [10].

Извлечение информации, которая связана между собой не логическими, а топологическими отношениями, представляет собой еще более сложную задачу [11], требующую многоэтапной обработки. Например, в [12] представлена структурированная схема извлечения данных, предназначенная для обогащения табличных данных. В [13] предлагается интегрировать экспертные знания, полученные как из академических материалов, так и из LLM, для извлечения знаний и повышения эффективности целевых решений. В [14] исследован вопрос использования наборов данных низкого качества, которые позволяют

адаптироваться к реальным условиям работы. Существующие детекторы текста, как правило, ориентированы на обнаружение одноуровневых текстовых сущностей. Для интерпретации и использования неструктурированных текстовых данных или документов сложной структуры могут применяться графы знаний [15]. В [16] предложена унифицированная структура для иерархического обнаружения текста в тех документах, где явная иерархия присутствует.

Касательно сферы организации дорожного движения, извлечение именованных сущностей из текстовой проектной документации базируется на знании предметной области и использовании профессиональных словарей [17], однако вопросы формализации и дальнейшего использования полученных сущностей не рассматриваются. В [18] реализуется другой подход, позволяющий создавать структурированную базу данных из доступных текстовых источников. В [19] предлагается новый подход, предлагающий исключить экспертов из процессов управления дорожным движением, используя *LLM* для логического мышления, понимания обстановки и принятия решений, однако решения такого класса в текущих правовых условиях не могут применяться на практике.

В настоящей работе мы комбинируем методы обработки естественного языка, методы на основе искусственного интеллекта, большие языковые модели и продукционные модели для автоматизации построения базы знаний и дальнейшего семантического анализа текстов стандартов, при этом на всех этапах обработки используется граф опроса, который включает в себя набор концепций, отношений и ограничений, определяющих структуру и взаимосвязи между атрибутами и их значениями в текстах стандартов.

Методология. При создании базы знаний из текста технического стандарта, регулирующего применение технических средств организации дорожного движения, важно извлечь ключевые атрибуты $D = \{d_j\}$, $j = \overline{1..M}$, характеризующие конкретные технические средства организации дорожного движения и конкретные условия и правила их применения. Используем продукции для формализации правил применения технических средств организации дорожного движения, записав их в следующем формате: $(i); Q; P; A \rightarrow B; N$, где i – имя продукции, Q – сфера применения (улица, автоторога, внутренние территории, парковки и т.п.), P – продукционное условие – предикат, обозначающий возможность применения продукции в заданных текущих условиях в текущий или заданный момент времени, $A \rightarrow B$ – ядро продукции (следствие), где «если» соответствует A , а «то» соответствует B , N – постуловия, т.е. предикат, который становится истинным после инициации ядра продукции, и символом \rightarrow обозначена импликация. Кроме этого, определим следующие булевы функции, которые

будут использоваться в процессе составления правил: *crossroad()* – функция возвращает признак наличия перекрестка на указанном участке транспортной сети; *urban()* – функция возвращает признак прохождения указанного участка транспортной сети в населенном пункте; *visibility_distance()* – функция возвращает числовое значение, соответствующее расстоянию видимости в рассматриваемой точке. Набор функций может расширяться в зависимости от рассматриваемых сфер применения. Набор извлекаемых атрибутов определяется решаемой задачей, в него могут включаться технические и эксплуатационные характеристики, правила установки, требования к применяемым обозначениям, условия эксплуатации и др.

Алгоритм извлечения правил применения технических средств организации дорожного движения из текстов технических стандартов предполагает выполнение следующих шагов:

1. На вход поступает машиночитаемый текст T технического стандарта общим объемом N символов.

2. Машиночитаемый текст T разбивается на K частей по n символов в каждой, т.е. $K = \lfloor N/n \rfloor$, при этом размер блоков текста n выбирается исходя из вычислительных возможностей аппаратного обеспечения.

3. Для каждой t_k из K частей текста T осуществляется следующая последовательность шагов:

а) Для каждого атрибута d_j из множества D выполняется следующая последовательность шагов:
– Часть текста t_k и атрибут d_j встраиваются в *prompt*-запрос.

– *Prompt*-запрос поступает на вход *LLM*.

– *LLM* генерирует ответ по найденному атрибуту на каждую t_k часть текста документа.

б) Объединение полученных ответов в один массив $\{d_j\}_{\forall (d_j \in D), t_k}$.

4. Объединение полученных ответов в единый массив ответов $\{d_j\}_{\forall (d_j \in D), t_k \in T}$.

5. По каждому ответу осуществляется поиск ответа в исходном тексте, что позволяет верифицировать полученные результаты, для этого последовательно выполняются:

– Поиск по точному совпадению.

– Поиск на основе регулярных выражений.

– Поиск с учетом неточностей (нечеткий поиск).

6. По набору верифицированных атрибутов \hat{D} осуществляется формирование правил, для чего на вход *LLM* подаются наборы верифицированных атрибутов $\hat{D} = \{\hat{d}_j\}$ и *prompt* для формирования правила в формате $(i); Q; P; A \rightarrow B; N$.

7. Набор правил сохраняется в виде базы знаний и алгоритм завершается.

Обработка текстов технических стандартов подразумевает, что на вход алгоритма поступают именно текстовые данные T , в связи с чем на

подготовительном этапе требуется преобразовать документ в текстовую форму. Для этого могут использоваться стандартные средства оптического распознавания символов (OCR).

Набор *prompt*-запросов формирует граф опроса, в котором вершины – *prompt*-запросы, сформулированные по отношению к заданному атрибуту, а дуги – возможные взаимосвязи между атрибутами, что позволяет представить набор концепций, отношений и ограничений, определенных в текстах технических стандартов.

Используемый *prompt*-запрос для извлечения атрибутов имеет следующий вид: «Ты – ИИ-анализатор текстов документов технических стандартов. Твоя задача – точно извлечь атрибут из текста документа технического стандарта. Извлеки из текста $\{t_k\}$ атрибут $\{a_j\}$ и используй следующую инструкцию:

1. Ищи строго в следующих местах:

– В разделе, который начинается со слов "Правила применения"

2. Критерии корректного атрибута:

– Атрибут должен указывать на техническое средство организации дорожного движения

– Атрибут должен соответствовать стилю технического стандарта

3. Обязательные проверки:

– Если атрибут встречается в разных формах, то выбирай наиболее полную

– Игнорируй технические названия

– Отбрасывай уточнения в скобках, кроме самых важных

Используй следующий формат вывода:

– Только строка в кавычках

– Без точек в конце

– Сохраняй оригинальные формулировки

– Если атрибут не соответствует критериям, то в вывод записывать строго "-"».

Запрос (*prompt*) для преобразования множества атрибутов (A) в набор правил в требуемом формате сформирован следующим образом: «Вам дано множество атрибутов $A = \{a_1, a_2, \dots\}$, представляющих характеристики условий применения технических средств организации дорожного движения. Каждый атрибут описывает определенное свойство ситуации или среды, влияющее на применение конкретного средства. Необходимо сформировать правило в формате $(i); Q; P; A \rightarrow B; N$, где: i : уникальное название продукции, Q : сфера применения (например, улица в населенном пункте, парковка), P : предикаты, определяющие возможности применения продукции, $A \rightarrow B$: ядро продукции, связывающее начальные условия (A) и следствия (B), N : постусловия, проверяемые после инициирования продукции. Правила формируются следующим образом: Условие (P) включает проверку всех необходимых атрибутов из множества A . Ядром продукции является утверждение вида "если" A "то" B . Постусловием (N) служит утверждение о

применимости или результате после активации продукции. В процессе формирования правил можно использовать следующие функции: *cross-road()*: признак наличия перекрестка на указанном участке транспортной сети; *urban()*: признак прохождения указанного участка транспортной сети в населенном пункте; *visibility_distance()*: числовое значение, соответствующее расстоянию видимости в рассматриваемой точке. Формализуйте каждое правило для каждого уникального имени продукции, соблюдая порядок атрибутов и формируя полные конструкции правил в указанном формате».

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет преобразовать текст технического стандарта в формализованный набор правил, которые могут быть использованы в машине логического вывода (прямого или обратного) для реализации поддержки принятия решений в процессе разработки или проверки схем организации дорожного движения.

Результаты. Программная реализация предложенного алгоритма выполнена с помощью библиотек подпрограмм (*SDK*) для текстопонимания и текстогенерации на основе технологий машинного обучения [20]. Из состава *SDK* использованы компоненты для разработки систем оптического распознавания и извлечения атрибутов, а также средства поддержки работы с документами в различных форматах, включая *PDF, PNG, JPG*. Для разработки использован язык программирования *Python 3.11* и веб-фреймворк *Django 3.2.6*. В качестве *LLM* использована *T-Pro 2.0*. Нечеткий поиск осуществляется на основе библиотеки *RapidFuzz*. Исходя из имеющегося аппаратного обеспечения (*CPU Intel Xeon Gold 6426Y/64 ядра, RAM 256 GB, SSD 14 TB, GPU 2x NVidia H100 80 GB nvlink*, операционная система *Ubuntu 24.04*) был выбран размер одного блока текста в 25000 символов.

Разработанные программные средства могут функционировать локально в контуре предприятий внедрения, не требуют подключения к сети Интернет.

Функциональные возможности разработанного программного средства позволяют выполнить оптическое распознавание машинопечатного текста в нормативных технических документах и сформировать формализованные правила размещения дорожных знаков, разметки, светофоров и других технических средств организации дорожного движения. При анализе текстов нормативных документов (рис. 1) осуществляется извлечение ключевых терминов и формализованных требований, осуществляется их классификация, а также выявляются логические противоречия и несоответствия между положениями технических стандартов.

Программное средство функционирует в соответствии с графом опроса, что позволяет извлекать и обрабатывать информацию из распознанного текста. На основе обработанного

массива документации и извлеченных атрибутов формируется продукционная база знаний. На основе сформированной базы знаний могут решаться различные практические задачи. Так, например, в автоматизированном режиме на схемах распознаются текстовые надписи и графические элементы (знаки, светофоры), а также выстраиваются логические связи между ними. Работа с графичес-

кими элементами осуществляется как с текстовыми – каждому графическому элементу ставится в соответствие текстовое представление. Полученные данные структурируются и сопоставляются с нормативными требованиями и терминами, извлеченными из текстов технических стандартов, что обеспечивает комплексный анализ предметной области (рис. 2).

Онтология База терминов База требований Соответствие ГОСТу ГОСТ Имяное ИИИ

← НАЗАД

Распознавание
ГОСТ Р 52289-2019.pdf

ГОСТ Р 52289-2019 Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств
Применяется с 01.04.2020 в связи с ГОСТ Р 52289-2004

Страница 1

ГОСТ Р 52289-2019

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Технические средства организации дорожного движения
ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ, РАЗМЕТКИ, СВЕТОФОРОВ, ДОРОЖНЫХ
ОГРАЖДЕНИЙ И НАПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

**Traffic control devices. Rules of application of traffic signs, markings, traffic lights, guardrails and
delineators**

Текст Сравнения ГОСТ Р 52289-2019 с ГОСТ Р 52289-2004 см. по ссылке.
- Примечание изготовителя базы данных.

ОКС 93.080.30 Дата введения 2020-04-01

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным автономным учреждением "Российский дорожный научно-исследовательский институт" (ФАУ "РОСДОРНИИ") Министерства транспорта Российской Федерации

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 278 "Безопасность дорожного движения"

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 декабря 2019 г. N 1425-ст

4 ВЗАМЕН ГОСТ Р 52289-2004

5 Стандарт полностью соответствует требованиям Конвенции о дорожных знаках и сигналах (Вена, 1968 г.) и Европейского соглашения, дополняющего эту Конвенцию* (Женева, 1971 г.), с учетом поправок (1995 г.)

* Доступ к международным и зарубежным документам, упомянутым в тексте, можно получить, обратившись в Службу поддержки пользователей. - Примечание изготовителя базы данных.

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. N 162-ФЗ "О стандартизации в Российской Федерации". Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе "Национальные стандарты", в официальный текст изменений и поправок - в ежемесячном информационном указателе "Национальные стандарты". В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя "Национальные стандарты". Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования - на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru)

1 / 10

Извлеченные атрибуты

Название атрибута	Значение
Тип документа	НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Название документа	Технические средства организации дорожного движения
Обозначение	ГОСТ Р 52289-2019
Дата утверждения	25.12.2019
Дата введения в действие	01.04.2020
Статус действия	Действующий
Термины и определения	<ul style="list-style-type: none"> Дорожный знак Основной знак Дублирующий знак Рабочая высота и ширина ограждения Высота ограждения Конструктивно выделенная раздельная полоса Динамический прогиб ограждения
Требования к дорожным знакам	<ul style="list-style-type: none"> Высота установки Расстояние видимости Размещение Допускается размещение на фасадах

ОТМЕНА СОХРАНИТЬ

Рисунок 1 – Извлечение атрибутов из текста технического стандарта

Онтология База терминов База требований Соответствие ГОСТу ГОСТ Имяное ИИИ

← НАЗАД

Проверка

Выявление несоответствий

1 Не соответствует
ГОСТ 52289-2019, п.5.7.18
Отсутствует дорожный знак 6.16 стоп-линия перед регулируемым перекрестком.

*п. 5.7.18.
Знак 6.16 "Стоп-линия" применяется для указания места остановки транспортных средств на регулируемых перекрестках, железнодорожных переездах и на улицах с односторонним движением. Знак устанавливается справа от дороги или над проезжей частью. Допускается устанавливать знак над каждой полосой движения. Знак применяется самостоятельно или с разметкой 1.12. Если знак применяется самостоятельно, то расстояние от знака до светофора, светофора или ближнего знака опрашиваем по 6.2.14, при этом высота установки знака 6.16 сбоку от проезжей части при отсутствии светофора 7.3* любых исполнений должна быть (1,5-6,0) м*.

1 Не соответствует
ГОСТ 52289-2019, п.6.2.14
Отсутствует дорожный разметки 1.12

*6.2.14.
Разметку 1.12 применяют перед перекрестком при наличии знака 2.3 "Знак имеет без ограничений", а также, где движение регулируется светофором, а также перед железнодорожными переездами (рисунки 8.7, 8.8, 8.10) и при наличии выемки (ямы) на проезды по платным дорогам. Разметку наносят перед перекрестком при наличии знака 2.3 на расстоянии не более 1 м от границы проезжей части. Разметку 1.12 наносят на расстоянии от 10 до 20 м от основного светофора 7.1 или 7.2 при расположении светофора над проезжей частью и от 3 до 10 м - при расположении сбоку от проезжей части для обеспечения видимости их сигналами, допускаются уменьшать расстояние до 5 м и 1 м соответственно при наличии светофора 7.3 любых исполнений (рисунки 8.20). При наличии регулируемого железнодорожного переезда разметку наносят на расстоянии не менее 1 м перед переездом (рисунки 8.20)*.

1 Не соответствует
ГОСТ 52289-2019, п.5.1.6
Отсутствует дублирующий дорожный знак 5.19.1 "Исходный поворот"

*5.1.6.
В населенных пунктах на дорогах с двусторонним движением с дорожкой в более полосами для движения в данном направлении, а также на дорогах с односторонним движением с тремя и более полосами, и на населенных пунктах на всех дорогах знак 5.19.1 дублируют над проезжей частью. Знак 5.19.1 над проезжей частью размещают не ближе от крайней правой полосы движения опосредственно края проезжей части.*

Рисунок 2 – Проверка схемы организации дорожного движения на соответствие правилам применения технических средств организации дорожного движения

Разработанное программное средство апробировано на текстах ГОСТ 52289-2019 и типовых схемах организации дорожного движения. В приведенном примере (рис. 2) фиксируется отсутствие дорожных знаков 6.16 перед регулируемым перекрестком, что противоречит п. 5.7.18 ГОСТ 52289-2019, фиксируется отсутствие дорожной разметки 1.12, что не соответствует требованиям п.6.2.14 и отмечается отсутствие дублирующих дорожных знаков 5.19.1, что не соответствует требованиям п. 5.1.6. Таким образом, в типовых условиях программное средство позволяет оказывать информационную поддержку разработчику схемы организации дорожного движения.

Применение разработанных программных средств на практике для анализа создаваемых проектов и схем организации дорожного движения на предмет соответствия установленным правилам в режиме онлайн требует проведения интеграции со специализированным программным обеспечением, которое используется разработчиками в процессе проектирования. Интеграция осуществляется посредством механизма *API* из состава *SDK*, с помощью которого на вход разработанному программному средству подается файл открытого формата для обмена графической информацией между приложениями *DXF*. Вывод информации осуществляется с использованием виджета, отображаемого поверх других окон и среды проектирования. Интеграция с проектной средой позволяет получать уведомления о нарушениях и вносить необходимые исправления в процессе разработки проекта. Таким образом, использование систем автоматизированного проектирования совместно с разработанным программным средством повысит оперативность процесса разработки схем организации дорожного движения.

Обсуждение. Представленный алгоритм предназначен для извлечения правил применения технических средств организации дорожного движения из текстов нормативных технических документов. Применение в алгоритме специального графа опроса позволяет обрабатывать документ без использования онтологии предметной области или специализированных словарей [6, 7], что уменьшает время за подготовку и запуск решения в эксплуатацию. Применение предложенного алгоритма, в отличие от средств общего назначения [2, 4, 14] и аналогов для транспортной сферы [17, 18], позволяет создать базу знаний, пригодную для использования в системах автоматизированного проектирования организации дорожного движения, таким образом, понимание целевого направления утилизации данных позволяет повысить эффективность обработки и извлекать только те знания, которые будут использованы конечным пользователем.

Однако существуют некоторые ограничения и проблемы, характерные для любого подобного подхода. Одним из недостатков является высокая

зависимость результата от качества предварительных данных и уровня детализации графа опроса. Недостаточное внимание к формированию адекватного графа может привести к потере значимых деталей или неправильному пониманию смысла текста технического стандарта. Кроме этого, обработка крупных объемов данных может потребовать значительных вычислительных ресурсов, что увеличивает временные затраты. Апробация проводилась на относительно небольших объемах текстов, в связи с чем, остается открытым вопрос масштабируемости подхода на большие объемы данных, используемые в дорожной отрасли.

Разработанное программное средство способно обрабатывать широкий спектр стандартных форматов хранения данных, включая *PDF*, *PNG*, *JPG* и *DXF*, что упрощает его внедрение в существующие рабочие процессы, а наличие механизма *API* позволяет реализовывать на его основе новые решения. Однако, функционирование *LLM* в локальном режиме требует существенных вычислительных мощностей. Таким образом, разработанное программное средство обладает значительным потенциалом для дальнейшей разработки и распространения в составе специализированных программ, использующихся проектировщиками организации дорожного движения.

Выводы. В статье предложен алгоритм извлечения правил применения технических средств организации дорожного движения непосредственно из текстов нормативных технических документов.

Данный алгоритм объединяет методы обработки естественного языка, интеллектуальные технологии, большие языковые модели и специализированную базу знаний предметной области. Для каждого этапа обработки информации применяется специальный опросный граф, включающий совокупность понятий, отношений и ограничивающих условий, структурирующих и связывающих атрибуты и их значения, содержащиеся в стандартах, что позволяет формализовать извлеченные правила для применения в качестве средства информационной поддержки для систем автоматизированного проектирования. Предложенный алгоритм и его программная реализация пригодны для применения при проектировании и в деятельности дорожного надзора государственной инспекции безопасности дорожного движения и дорожно-эксплуатационных служб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чекина Е.В., Головнин О.К. Цифровая трансформация процесса разработки проектов организации дорожного движения // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 12. – С. 206-209.
2. Аверина М.Д., Леванова О.А. Извлечение именованных сущностей из русскоязычных документов с различной выраженностью структуры // Моделирование и анализ информационных систем. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 382-393.
3. Пеньшин И.С. О возможности применения нейро-

сетевых технологий для оптимизации нормоконтроля конструкторской документации в организациях оборонно-промышленного комплекса // *Аэрокосмическая техника и технологии*. – 2024. – Т. 2. – № 4. – С. 138-148.

4. Гостева Е.А., Ланин В.В. Реализация системы интеллектуального поиска информации в промышленных стандартах // *Информационные технологии*. 2021. Т. 27. № 6. С. 322-330.

5. Шемонаев Д.Д., Анни П.В., Жабицкий М.Г., Конев Ю.Н. Разработка системы для анализа технических и организационных документов на соответствие нормативным требованиям атомной отрасли на основе больших лингвистических моделей // *International Journal of Open Information Technologies*. 2025. Т. 13. № 8. С. 20-27.

6. Сидорова Е.А., Иванов А.И., Овчинникова К.А. Извлечение информации из текстов на основе онтологии и больших языковых моделей // *Онтология проектирования*. 2025. Т. 15. № 1(55). С. 114-129.

7. Ivaschenko A., Golovnin O., Syusin I., Krivosheev A., Aleksandrova M. Ontology based text understanding and text generation for legal technology applications // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 739. P. 1080-1089.

8. Luttmer J., Prihodko V., Ehring D., Nagarajah A. Requirements extraction from engineering standards—systematic evaluation of extraction techniques // *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 119. P. 794-799.

9. Zadgaonkar A., Agrawal A.J. An approach for analyzing unstructured text data using topic modeling techniques for efficient information extraction // *New Generation Computing*. 2024. Vol. 42. No. 1. P. 109-134.

10. Oliveira V., Nogueira G., Faleiros T., Marcacini R. Combining prompt-based language models and weak supervision for labeling named entity recognition on legal documents // *Artificial Intelligence and Law*. 2025. Vol. 33. No. 2. P. 361-381.

11. Syed M.A., Arsevska E., Roche M., Teisseire M. GeospatRE: extraction and geocoding of spatial relation entities in textual documents // *Cartography and Geographic Information Science*. 2025. Vol. 52. No. 3. P. 221-236.

12. Chen K., Koudas N. Unstructured data fusion for schema and data extraction // *Proceedings of the ACM on Management of Data*. 2024. Vol. 2. No. 3. P. 1-26.

13. Liu X., Erkoyuncu J.A., Fuh J.Y.H., Lu W.F., Li B. Knowledge extraction for additive manufacturing process via named entity recognition with LLMs // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2025. Vol. 93. P. 102900.

14. Zhou J., Ma Z. Named entity recognition for construction documents based on fine-tuning of large language models with low-quality datasets // *Automation in Construction*. 2025. Vol. 174. P. 106151.

15. Zhang W., Chen Y., Liu X., Zhang H. A large language model-based approach to building the knowledge graph for master plan: A case study in Guangzhou, China // *Land Use Policy*. 2025. Vol. 159. P. 107807.

16. Liang M., Ma J.W., Zhu X., Qin J., Yin, X.C. Layoutformer: Hierarchical text detection towards scene text understanding // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2024. Vol. 15665-15674.

17. Wang H., Zhang C., Zhang B., Wang P. SoftLexicon-BERT-BiLSTM-CRF-based named entity recognition model for transportation organization design domain // *IEEE International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning*. 2023. P. 203-207.

18. Surendra A., Sood K., Albuquerque C., Akbar S., Joshi G., Sakshi P. Revolutionizing road accident analysis: A deep learning approach to entity recognition and extraction // *IEEE 15th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference*. 2024. P. 308-314.

19. Masri S., Ashqar H.I., Elhenawy M. Large language models (LLMs) as traffic control systems at urban intersections: A new paradigm // *Vehicles*. 2025. Vol. 7. No. 1. P. 11.

20. Ivaschenko A., Krivosheev A., Stolbova A., Golovnin O. Hybridization of intelligent solutions architecture for text understanding and text generation // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(11). P. 5179.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 004.514

EDN: ZVDUEG

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ РАЗДЕЛОВ РАБОЧИХ ПРОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И RAG

© Авторы 2025

SPIN: 5378-0207

AuthorID: 644194

ORCID: 0000-0002-3292-7260

ГУДКОВ Кирилл Владимирович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационные технологии и системы»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: gudkovk.pgta@gmail.com)

ШИРИКОВ Роман Сергеевич, инженер-программист
ООО Научно-производственная фирма «КРУГ»
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 1Г, e-mail: romychan333@gmail.com)

Аннотация. Работа посвящена разработке и оценке системы генерации разделов для рабочих программ по дисциплинам с использованием языковой модели и подхода *Retrieval Augmented Generation*, который сочетает возможности генеративных моделей с возможностью поиска и извлечения релевантной информации из внешних баз данных. Система предназначена для автоматизации процесса создания рабочих программ и может быть использована в образовательных учреждениях для повышения эффективности и качества образования. В работе также использован объектно-ориентированный подход для документирования требований, с применением средств языка *UML* и реализацией в инструменте визуального моделирования *PlantUML*. Для оценки качества генерируемых разделов применена методология *Retrieval Augmented Generation Automated Scoring*, которая позволяет оценить качество отдельных компонентов системы. Так же выполнено определение оптимального баланса между количеством извлекаемых фрагментов из векторной базы данных и точностью сгенерированного ответа. Разработанная система позволяет повысить качество и скорость создания рабочих программ, а также обеспечивает гибкость и адаптивность в соответствии с меняющимися образовательными требованиями.

Ключевые слова: информационная система, искусственный интеллект, языковые модели, рабочие программы, *Retrieval Augmented Generation*, *Retrieval Augmented Generation Automated Scoring*.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR GENERATION OF WORK PROGRAM SECTIONS USING LANGUAGE MODELS AND RAG

© The Author(s) 2025

GUDKOV Kirill Vladimirovich, candidate of technical sciences,
associate professor of Department of Information Technologies and Systems
Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, d. 1a/11, e-mail: gudkovk.pgta@gmail.com)

SHIRIKOV Roman Sergeevich, software engineer
LLC KRUG Research and Production Firm
(440028, Russia, Penza, German Titov Street, 1, e-mail: romychan333@gmail.com)

Abstract. This paper develops and evaluates a system for generating sections for coursework syllabi using a language model and the *Retrieval Augmented Generation* approach, which combines the capabilities of generative models with the ability to search and extract relevant information from external databases. The system is designed to automate the process of creating coursework syllabi and can be used in educational institutions to improve the efficiency and quality of education. The paper also utilizes an object-oriented approach for documenting requirements, using *UML* tools and implementation in the *PlantUML* visual modeling tool. To assess the quality of the generated sections, the *Retrieval Augmented Generation Automated Scoring* methodology is used, allowing for the evaluation of individual system components. The optimal balance between the number of fragments retrieved from a vector database and the accuracy of the generated response is also determined. The developed system improves the quality and speed of creating coursework syllabi, and also provides flexibility and adaptability in accordance with changing educational requirements.

Keywords: information system, artificial intelligence, language models, work programs, *Retrieval Augmented Generation*, *Retrieval Augmented Generation Automated Scoring*.

Для цитирования: Гудков К.В. Разработка системы генерации разделов рабочих программ с использованием языковых моделей и RAG / К.В. Гудков, Р.С. Шириков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 114-120. – EDN: ZVDUEG.

Введение. В современном образовательном процессе разработка рабочих программ по дисциплинам играет важную роль, так как именно эти документы определяют структуру и содержание курсов, влияют на качество преподавания и формируют основу для достижения студентами необходимых компетенций. Эффективность образовательного процесса напрямую связана с качеством разработанных программ, которые должны соответствовать как внутренним стандартам учебного заведения, так и внешним требованиям федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС). Этот процесс требует значительных временных и интеллектуальных затрат со стороны преподавателей, так как каждая программа должна учитывать множество факторов: содержание курса, образовательные цели, формы контроля знаний и многое другое.

Создание новых или модернизация имеющихся рабочих программ это трудоемкий процесс включающий в себя работу с различными источниками знаний и требующий высокой методической подготовки. Критический анализ новых тенденций в преподаваемой дисциплине, модернизация заданий под современные требования и проработка контрольных и проверочных материалов требуют значительного времени на работу с каждой рабочей программой, что в дальнейшем негативно сказывается на адаптации учебного плана специальности в целом.

Использование искусственного интеллекта для решения рутинных задач при модернизации или разработке новых рабочих программ позволит сократить временные затраты. Применение готовых языковых моделей с возможностью учета контекста и релевантности используемой информации из различных внешних источников [1, 2] позволит выполнять автоматизированную генерацию отдельных разделов рабочих программ с применением метода *Retrieval Augmented Generation (RAG)*[3,4]. Применение метода *RAG* позволяет соединить языковую модель и базу знаний, в которую входят не только уже разработанные рабочие программы, учебные планы, методические рекомендации, но и дополнительные источники информации. Помимо этого выполняется анализ внешних источников и на основе всех собранных данных проводится векторный поиск, ранжирование и генерация рабочих программ. Цель данной работы состоит в разработке системы генерации разделов рабочих программ с использованием языковых моделей и *RAG*, что позволит значительно сократить трудозатраты при разработке новых или модернизации имеющихся рабочих программ.

Методология. В системе разработки разделов рабочих программ помощью ИИ использована метода *RAG*, которая позволяет проводить генерацию на основе извлеченного контекста из базы знаний и внешних источников [5-7]. Суть метода заключается

в предварительном поиске подходящих фрагментов информации в базе данных до начала генерации текста, что позволило создать более точные и информативные результаты по сравнению с теми, которые могут быть получены исключительно на основе одной языковой модели.

Подход, используемый в работе, включал несколько этапов. Сначала проводилось извлечение контекста: поиск релевантных фрагментов информации в базе данных. Для этого применялась векторная база данных *ChromaDB*, содержащая предварительно обработанные и индексируемые документы. Векторизация документов выполнялась с использованием модели *infloat/multilingual-e5-large*. Затем найденные контекстные фрагменты передавались языковой модели для генерации разделов. В качестве генераторов использовались три разные модели: *YandexGPT Pro 32k*, *Llama-3.1-70B* и *GigaChat Max*, каждая из которых тестировалась отдельно для оценки их в задаче генерации разделов для рабочих программ.

Для фиксации требований [8] к создаваемой системе был выбран объектно-ориентированный метод с применением нотации *Unified Modeling Language (UML)* [9, 10]. В рамках исследуемой предметной области *UML* использовался для построения графических схем и технических описаний. Диаграммы вариантов использования, деятельности и последовательности были разработаны посредством инструмента визуального моделирования *PlantUML*.

Для оценки качества работы отдельных компонентов системы была применена методология *RAGAS (Retrieval Augmented Generation Automated Scoring)* [11, 12]. Эта методология позволяет автоматически оценивать качество генерации текста, учитывая такие аспекты, как релевантность сгенерированных разделов (*Answer Relevancy*) и их точность (*Faithfulness*). Кроме того, для оценки извлекаемого контекста использовалась метрика точности извлечения фрагментов (*Context Precision*).

Результаты. Результатом анализа и документирования требований выступают *UML* диаграммы. Для того чтобы сформировать требования к системе была произведена разработка диаграммы вариантов использования, представленная на рисунке 1. Она позволила провести моделирование процессов функционирования приложения и описать взаимодействия с ключевыми участниками. Ключевыми участниками в системе выступили пользователь, векторная модель ИИ, модель генерации ИИ, сервер.

Пользователь участвует в работе системы, передавая ей необходимые данные в виде файлов *PDF*, содержащих образовательные материалы. После загрузки файла именно он инициирует генерацию разделов. Полученные материалы обрабатываются двумя специализированными моделями искусственного интеллекта: одна занимается преобразованием текста в вектора, другая же

генерирует разделы, учитывая полученные данные и заданный контекст. Обеспечение эффективной связи между всеми элементами осуществляется посредством сервера, выполняющего координационную роль.

На начальном этапе произведена загрузка рабочей программы в формате *PDF*. После чего был извлечен

текст из документа и выполнено фрагментирование текста. Следующим шагом была выполнена векторизация фрагментов на основании векторной модели ИИ. Полученные вектора сохранены в векторной базе данных с целью их дальнейшего использования

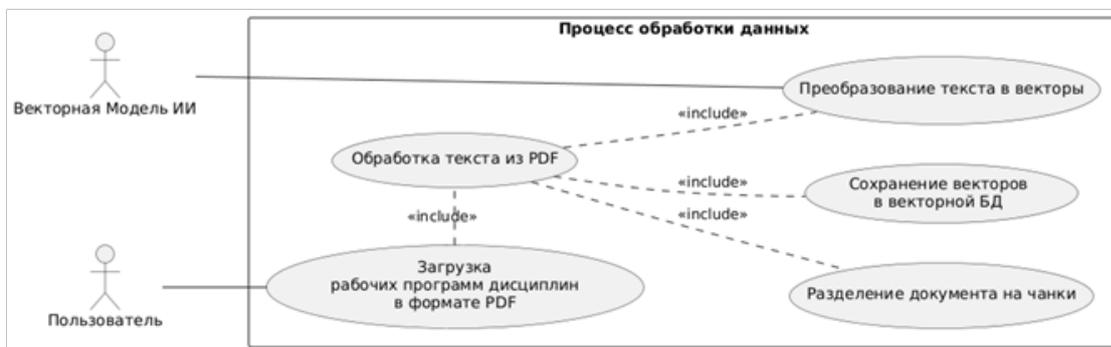


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования для процесса обработки данных

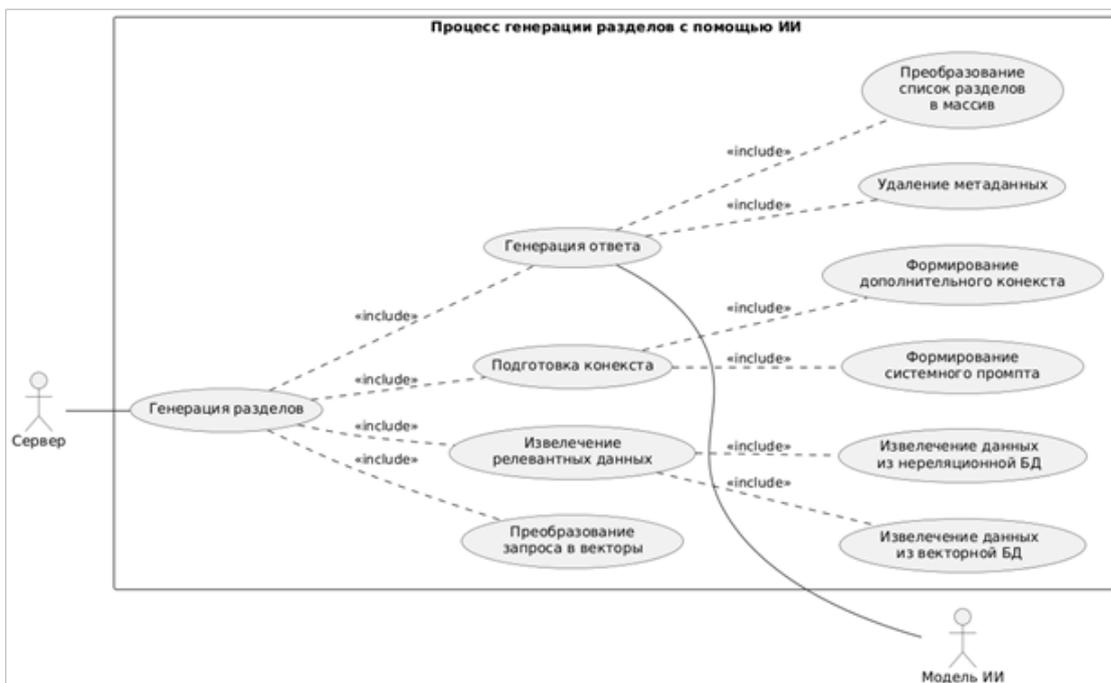


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования для процесса генерации разделов с помощью ИИ

Использование ИИ при генерации разделов, представленное на рисунке 2, включает в себя подпроцессы извлечения данных, подготовку контекста и представление данных. Извлечение релевантных данных производится путем поиска векторов с последующей выборкой их из векторной базы, а так же с использованием процедуры извлечения информации из нереляционной базы данных. В ней содержится информация о курсах, планах и других источниках. Для повышения качества генерации были предварительно сформированы и записаны базовые инструкции и добавлена дополнительная информация. Это в свою очередь позволило улучшить качество сгенерированных

документов. Так же было произведено удаление промежуточных метаданных, а сгенерированные разделы были преобразованы в удобный для пользователя формат в соответствии с загруженным шаблоном.

Для повышения точности и эффективности этапа генерации разделов была выполнена дополнительная обработка данных. Ее основные этапы детализированы в диаграмме деятельности, представленной на рисунке 3.

На начальном этапе пользователем выполнялась загрузка ранее разработанных рабочих программ дисциплин в формате *PDF*. Их содержание позволяет полностью структурировать содержание

дисциплины и понять тематику разделов, содержание лабораторных и практических заданий, а так же систему оценки качества знаний студентов. Документ имеет сложную структуру, состоящую из большого числа разделов с заголовками, параграфами. Так же он включает в себя множество табличных данных.

На начальном этапе выполнялось разбиение извлеченного текста на фрагменты длиной в 1000 символов. Перекрытие между фрагментами составляло 100 символов. Такой подход позволяет добиться сохранения контекста и значительно снижает ресурсоемкость операций. После чего модель ИИ,

предназначенная для работы с многоязычными текстами, выполняла векторизацию текстовой информации на основе смыслового значения слов и предложений в многомерном пространстве. После выполнения векторизации полученные векторы сохранялись в векторной базе данных. Это позволило использовать различные математические операции и преобразования при работе с данными для поиска и оценки подобия элементов.

На завершающем этапе анализа и документирования требований была разработана диаграмма последовательности для процесса генерации разделов с помощью ИИ, представленная на рисунке 4.

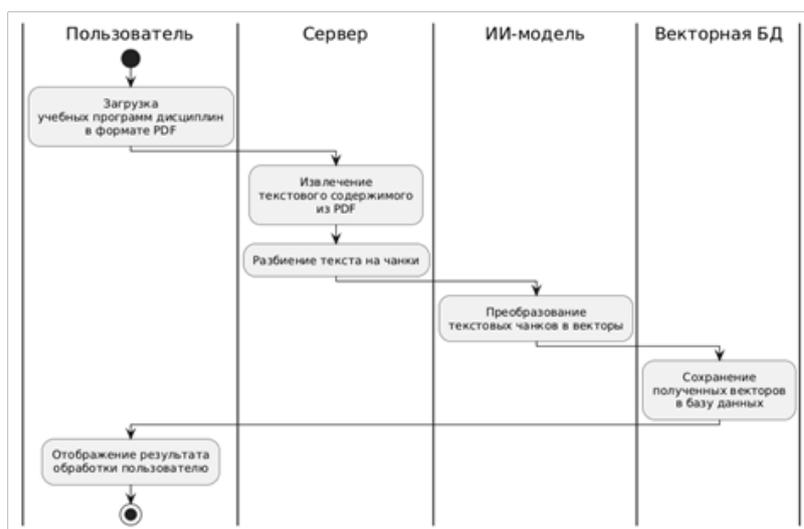


Рисунок 3 – Диаграмма деятельности процесса обработки данных



Рисунок 4 – Диаграмма последовательности процесса генерации разделов с помощью ИИ

На начальном этапе пользователь взаимодействовал с системой через графический интерфейс (формой отправки) путем ввода необходимой информации. Пользователь заполнял поля формы, указывая номера раздела, курса и другие метаданные, которые будут использованы для последующего извлечения и генерации информации. Форма отправки передавала собранные данные

на сервер, включая номер раздела, курс и прочие указанные пользователем метаданные.

После получения данных от клиента сервер запускал процесс обработки запроса. Первый шаг включал обращение к нереляционной базе данных, где хранятся все необходимые сведения о курсах и учебных планах. Из этой базы извлекалась вся доступная информация, соответствующая

введённым пользователем критериям. Система фильтровала эти данные, оставляя только те записи, которые удовлетворяют условиям запроса. Например, если запрос касался конкретного курса, то система отбирала исключительно те записи, которые относились именно к этому курсу. Дополнительно было возможно применять фильтры по году выпуска учебного плана, уровню образования, наименования дисциплины, типу занятий (лекции, семинары, лабораторные работы) и другим параметрам.

После этого сервер инициировал процесс векторизации запроса пользователя, применяя ту же методологию, что и в процессе подготовке данных. Полученный вектор запроса использовался для поиска в векторной базе данных наиболее близких векторов, соответствующих фрагментам, содержащим релевантную информацию. Таким образом, формировался список данных, которые становятся дополнительным контекстом для ИИ-модели. Этот этап соответствовал начальной стадии метода *RAG – Retrieval*, во время которого происходил сбор необходимых данных из внешних источников [13, 14].

Далее происходило формирование контекста, который передавался ИИ-модели для генерации разделов. Данные, полученные из нереляционной базы данных, интегрировались в системную инструкцию, тогда как результаты поиска из векторной базы данных использовались в качестве дополнительного контекста. Системная инструкция содержала основную информацию, необходимую для генерации разделов, такую как название и индекс программы, информацию о курсе, направлении подготовки и т.д. Дополнительный контекст, полученный из векторной базы данных, обогащал этот запрос, предоставляя ИИ дополнительные знания и ссылки, повышая точность и релевантность генерируемых разделов. Этот процесс соответствовал второй части *RAG-метода – Augmentation*, подразумевающей дополнение исходного запроса данными, полученными из базы знаний [15, 16]. В результате описанного выше процесса формирования контекста итоговое сообщение для ИИ-модели выглядело следующим образом: *Вы являетесь преподавателем технического университета, специализирующимся на дисциплине "Введение в программирование" для студентов*

бакалавриата 1 курса, обучающихся по направлению "Информационные системы и технологии" (профиль "Информационные системы в технике и технологиях") в 2024 году. Ваша задача состоит в том, чтобы создать список уникальных, подробных и соответствующих тем лекционных занятий для раздела "Введение в программирование". Ответ должен быть представлен в следующем формате: Номер раздела. Название темы. Дополнительный контекст: ...

Затем модель ИИ обрабатывала полученный запрос и формировала результат – список разделов, подходящих под указанный курс. Этот шаг соответствовал заключительной стадии *RAG – Generation*, при которой генерировался ответ на основе собранных данных [17].

Полученные разделы проходили дополнительную обработку на стороне сервера. Из них удалялись лишние метаданные, технические символы и любые другие элементы, которые не должны были отображаться конечному пользователю. Затем разделы преобразовывались в массив, что упрощало дальнейшую работу с ними и их передачу пользователю.

Завершающим шагом стало представление результатов пользователю. Он получал перечень предложенных разделов, которые можно было просматривать, сохранять или напрямую внедрять в рабочие программы.

Оценка эффективности работы системы. Для оценки эффективности работы отдельных элементов системы генерации разделов для рабочих программ с использованием *RAG* была применена методология *RAGAS* [18]. Количество извлекаемых фрагментов из векторной базы данных было установлено равным трём, что, как показал анализ, представляет собой оптимальный компромисс между точностью сгенерированного ответа и точностью извлечённого контекста, обеспечивая наилучшее соотношение этих показателей.

При меньшем количестве фрагментов модели выдавали более точные ответы, однако это происходило за счет ограничения объема извлекаемой информации. Увеличение количества фрагментов могло бы привести к снижению точности ответов вследствие перегрузки модели избыточными данными (рис. 5).

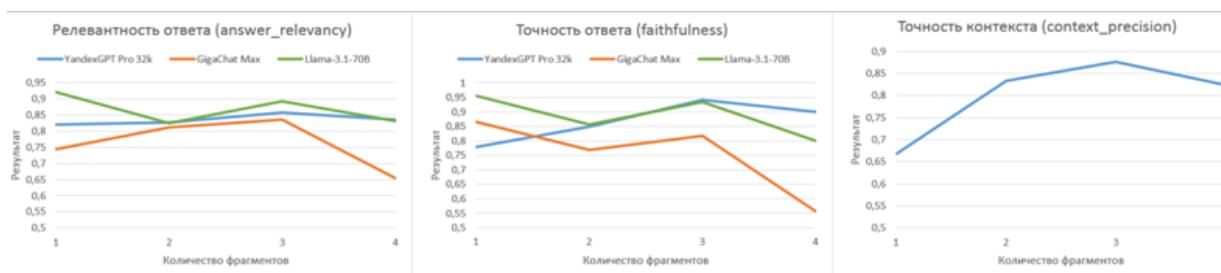


Рисунок 5 – Качество системы в зависимости от извлекаемых фрагментов из векторной базы данных

Для анализа и оценки эффективности работы различных языковых моделей в контексте генерации разделов рабочих программ были выбраны три модели: *YandexGPT Pro 32k*, *Llama-3.1-70B* и *GigaChat Max* [19-21]. Основной целью данного этапа исследования являлось проведение сравнительного анализа релевантности сгенерированных разделов, а также оценка их точности. Результаты эксперимента приведены на рисунке 6. Каждая из моделей была протестирована на одинаковых наборах данных, включающих реальные рабочие программы.

С целью выявления наиболее результативной модели ИИ для генерации учебных материалов и их потенциала применения для генерации разделов рабочей программы были выполнены сравнения эффективности применения этих моделей в рамках методологии *RAGAS*.

Для оценки практической эффективности системы был проведён эксперимент, в ходе которого сравнивались ручная разработка и автоматизи-

рованная генерация разделов рабочей программы по дисциплине «Введение в программирование» для студентов первого курса бакалавриата, обучающихся по направлению «Информационные системы и технологии».

Традиционный подход потребовал от преподавателя более часа на анализ требований ФГОС, структурирование учебного материала, согласование содержания и оформление документации. В то же время разработанная система справилась с генерацией первоначального варианта всех разделов за 10 минут, включая загрузку и обработку *PDF*-документов, а также формирование итогового документа. Преподавателю дополнительно потребовалось около 5-10 минут на проверку и адаптацию сгенерированных разделов под специфику учебной группы. Таким образом, общее время сократилось до 15-20 минут, что соответствует сокращению трудозатрат на 60% по сравнению с ручным методом. Пример сгенерированного раздела для лабораторных работ представлен ниже в таблице 1.

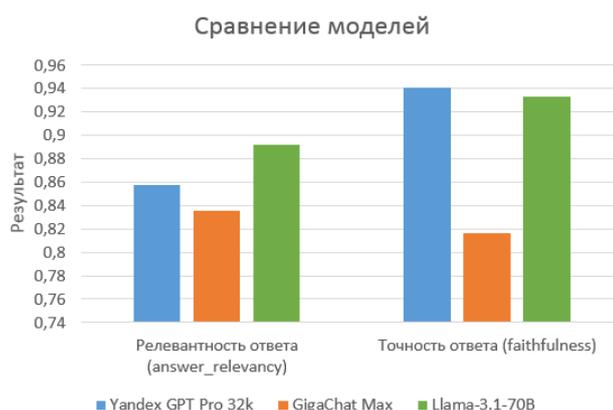


Рисунок 6 – Сравнение различных языковых моделей в контексте генерации разделов рабочих программ

Таблица 1 – Пример сгенерированного раздела

№ п/п	Наименование раздела	Академ. час
Раздел 5. Основы языка Си		
1	Создание и запуск простейших программ на языке Си	2.7
2	Основные типы данных и их использование.	2.6
3	Операторы присваивания инкремента и декремента	2.7
4	Условный оператор <i>if-else</i>	2.7
5	Циклы <i>for while</i> и <i>do-while</i>	2.7
6	Массивы и указатели	2.7
7	Функции и их использование	2.7
8	Работа с файлами	2.6
9	Структуры и объединения	2.7

Экспертная оценка, проведённая независимыми преподавателями, подтвердила, что сгенерированная рабочая программа соответствует требованиям ФГОС и требует лишь минимальной корректировки. Эти результаты демонстрируют не только техническую работоспособность системы, но и её практическую эффективность в реальных условиях образовательного процесса.

Обсуждение. Исходя из проведенного анализа видно, что использование методов *RAG* позволяет выполнять генерацию рабочих программ на высоком уровне. Это позволит в значительной мере автоматизировать процесс создания как отдельных частей рабочих программ, основываясь на современных тенденциях развития отрасли в рамках которой преподается дисциплина, так и в дальней-

шем выполнять генерацию рабочей программы целиком с учетом требований конкретного преподавателя. Тем самым значительно повысится гибкость и адаптируемость рабочих программ в соответствии с современными требованиями. Для этого необходимо соблюдение оптимального баланса между качеством генерируемых материалов и вычислительной нагрузкой на сервер. Одним из критериев оценки подобного баланса может служить соотношение между количеством извлекаемых фрагментов из векторной базы данных и точностью сгенерированного ответа. Как было продемонстрировано в исследовании, использование трёх фрагментов обеспечило наилучшее соотношение точности ответа и релевантности извлечённого контекста. Это важно для поддержания высокого качества и актуальности генерируемых разделов.

Проведенный сравнительный анализ языковых моделей показал: *Llama-3.1-70B* с релевантностью ответа 85% и точностью 94% обладает наибольшим потенциалом для создания разделов рабочих программ; *Yandex GPT Pro 32k* при релевантности 85% и точности 94% эффективнее для решения задач со строгим соблюдением установленных норм и стандартов, например при адаптации существующих программ к новым требованиям; *GigaChat Max*, продемонстрировал удовлетворительные результаты генерации с величиной релевантности около 83%, но значительно уступает по критериям оценки при точности менее 82%.

Выводы. Результаты работы свидетельствуют об успешном использовании ИИ и методов *RAG* для оптимизации рутинных задач в образовательном процессе. Применение метода *RAG* позволило использовать не только сформированную базу знаний, но выполнять анализ внешних источников, что значительно повысило адаптируемость рабочих программ к быстро меняющимся условиям обучения. Также были значительно сокращены трудозатраты преподавателя. Эксперимент показал, что время на составление одной рабочей программы сократилось на 60%, при условии обязательной проверки сгенерированных разделов. Дальнейшие работы в данном направлении следует направить на повышение качества генерируемых материалов, а так же на интеграцию проектируемой системы с другими системами управления учебным процессом. На основании этого можно заключить, что комбинация ИИ и метода *RAG* имеет потенциал развития, как перспективного способа автоматизации разработки и модернизации рабочих программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шевцова Инесса Витальевна, Днепровская Наталья Витальевна Анализ влияния цифровизации документов об образовании на профессиональную подготовку и занятость // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2025. – №1.

2. Афанасьева Ольга Владимировна, Едунова Мария Алексеевна Использование информационных технологий для снижения временных затрат на организационные процессы государственной итоговой аттестации в вузах // Концепт. – 2025. – №2.

3. Науменко А.О. О. технология RAG (Retrieval-Augmented Generation) как инновационный подход в LLM // Вестник науки. – 2025. – №8 (89).

4. Оболенский Денис Михайлович, Шевченко Виктория Игоревна Использование метода RAG и больших языковых моделей в интеллектуальных образовательных экосистемах // Экономика. Информатика. – 2024. – №3.

5. Gao Y. et al. Retrieval-augmented generation for large language models: A survey // arXiv preprint arXiv:2312.10997. – 2023.

6. Мельников Андрей Витальевич, Николаев Иван Евгеньевич, Русанов Михаил Александрович, Аббазов Валерьян Ринатович Сравнительный анализ методов RAG для построения русскоязычных интеллектуальных сервисов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2025. – №2.

7. Радюш Д.В. Методы интеграции знаний для разработки вопросно-ответных систем // Russian Technological Journal. – 2025. – Т. 13. – №. 3. – С. 21-43.

8. Бакулин Иван Александрович, Червяков Леонид Михайлович, Бычкова Наталья Александровна Моделирование технических требований к программным продуктам // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2025. – №2.

9. Методология программной инженерии: учеб. пособие / Г.А. Дорпер ; СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2021. – 190 с.

10. Шульга Т.Э., Храмов Д.Э. Онтология жизненного цикла разработки программного обеспечения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – №. 2. – С. 66-74.

11. Es S. et al. Ragas: Automated evaluation of retrieval augmented generation // arXiv preprint arXiv:2309.15217. – 2023.

12. De Lima R.T. et al. Know Your RAG: Dataset Taxonomy and Generation Strategies for Evaluating RAG Systems // arXiv preprint arXiv:2411.19710. – 2024.

13. Zhao P. et al. Retrieval-Augmented Generation for AI-Generated Content: A Survey // arXiv preprint arXiv:2402.19473. – 2024.

14. Мельников Андрей Витальевич, Николаев Иван Евгеньевич, Русанов Михаил Александрович, Аббазов Валерьян Ринатович Сравнительный анализ методов RAG для построения русскоязычных интеллектуальных сервисов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2025. – №2.

15. Zhao S. et al. Retrieval Augmented Generation (RAG) and Beyond: A Comprehensive Survey on How to Make your LLMs use External Data More Wisely // arXiv preprint arXiv:2409.14924. – 2024.

16. Zhang X. et al. Raglab: A modular and research-oriented unified framework for retrieval-augmented generation // arXiv preprint arXiv:2408.11381. – 2024.

17. Zhu K. et al. RAGEval: Scenario Specific RAG Evaluation Dataset Generation Framework // CoRR. – 2024.

18. Oro E. et al. Evaluating Retrieval-Augmented Generation for Question Answering with Large Language Models. – 2024.

19. Gu Z. et al. Empowering large language models for automated clinical assessment with generation-augmented retrieval and hierarchical chain-of-thought // Artificial Intelligence in Medicine. – 2025. – Т. 162. – С. 103078.

20. Sorour S.E., Almusallam N. L3D-RAG: Leveraging LLaMA 3.1 and DeepSeek with Retrieval-Augmented Generation (RAG) for advanced Reddit community analysis // Alexandria Engineering Journal. – 2025. – Т. 131. – С. 125-152.

21. Lin T. et al. Evaluating the accuracy of advanced language learning models in ophthalmology: A comparative study of ChatGPT-4o and Meta AI's Llama 3.1 // Advances in Ophthalmology Practice and Research. – 2025. – Т. 5. – №. 2. – С. 95.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 663.86

EDN: BFKOVO

РАЗРАБОТКА НАПИТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЯБЛОЧНОГО СОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛЬГИНАТНОЙ СФЕРИФИКАЦИИ *RIBES NIGRUM*

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7537-3237

AuthorID: 14522827300

ORCID: 0000-0002-0470-7324

ResearcherID: JFJ-0378-2023

ScopusID: 14522827300

ЛАЗАРЕВ Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой биотехнологии и инжиниринга
Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: lazarev.eka@gmail.com)

SPIN: 6181-2038

AuthorID: 1260992

ORCID: 0009-0001-5442-4808

ПОРОШИНА Дарья Денисовна, старший лаборант кафедры биотехнологии и инжиниринга
Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: poroshina.darya17@gmail.com)

Аннотация. В работе представлена разработка функционального напитка на основе яблочного сока с применением альгинатной сферизации сокодержательной мякоти черной смородины (*Ribes nigrum*) для повышения его пищевой ценности. Обоснован выбор ингредиентов и технологии, позволяющей инкапсулировать полезные вещества в сферические формы, создавая уникальные сенсорные характеристики. Представлены результаты органолептической и физико-химической оценки разработанного напитка, демонстрирующие значительное увеличение содержания витаминов ($C, B_5, B_6, B_1, B_9, B_2$) и антиоксидантной активности по сравнению с контрольным образцом. На основании полученных данных сделан вывод об эффективности использования альгинатной сферизации для создания функционального напитка с повышенной пищевой ценностью и потенциальной пользой для здоровья. Разработанный напиток может быть рекомендован для включения в рацион различных групп населения, стремящихся к здоровому образу жизни и профилактике заболеваний.

Ключевые слова: функциональный напиток, яблочный сок, черная смородина, альгинатная сферизация, *Ribes nigrum*, витамины, пищевая ценность.

DEVELOPMENT OF A FUNCTIONAL DRINK BASED ON APPLE JUICE USING ALGINATE SPHERIFICATION *RIBES NIGRUM*

© The Author(s) 2025

LAZAREV Vladimir Alexandrovich, candidate of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Biotechnology and Engineering
Ural State University of Economics

(Russia, 620144, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli St., 62/45, e-mail: lazarev.eka@gmail.com)

POROSHINA Darya Denisovna, senior laboratory assistant at the Department of Biotechnology and Engineering
Ural State University of Economics

(Russia, 620144, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnoy Voli St., 62/45, e-mail: poroshina.darya17@gmail.com)

Abstract. The paper presents the development of a functional drink based on apple juice using alginate spherification of the juice-containing pulp of black currant (*Ribes nigrum*) to increase its nutritional value. The choice of ingredients and technology is justified, which makes it possible to encapsulate useful substances in spherical shapes, creating unique sensory characteristics. The results of the organoleptic and physico-chemical evaluation of the developed drink are presented, demonstrating a significant increase in the content of vitamins ($C, B_5, B_6, B_1, B_9, B_2$) and antioxidant activity compared with the control sample. Based on the data obtained, a conclusion is made about the effectiveness of using alginate spherization to create a functional drink with increased nutritional value and potential health benefits. The developed drink can be recommended for inclusion in the diet of various population groups seeking a healthy lifestyle and disease prevention.

Keywords: functional drink, apple juice, black currant, alginate spherification, *Ribes nigrum*, vitamins, nutritional value.

Для цитирования: Лазарев В.А. Разработка напитка функционального назначения на основе яблочного сока с применением альгинатной сферификации *Ribes nigrum* / В.А. Лазарев, Д.Д. Порошина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 121-127. – EDN: BFKOVO.

Введение. Разработка функциональных продуктов питания стала одной из наиболее важных и быстрорастущих тенденций современной пищевой промышленности. Растущая осведомленность потребителей о взаимосвязи между питанием и здоровьем привела к увеличению спроса на продукты, которые не только удовлетворяют основные потребности в питании, но и способствуют профилактике хронических заболеваний и общему благополучию [1]. Функциональные продукты питания, в состав которых входят биоактивные ингредиенты с дополнительным полезным эффектом, играют решающую роль в данной тенденции [1]. Среди этой продукции особую популярность приобрели функциональные напитки благодаря простоте употребления и возможности обогащения различными биоактивными соединениями [2].

Функциональный напиток – это жидкий функциональный пищевой продукт на основе воды, содержащий один или несколько функциональных пищевых ингредиентов в количестве достаточном при систематическом употреблении для обеспечения благоприятного эффекта на физиологические функции организма человека, с добавлением или без добавления различных пищевых добавок и вкусоароматических веществ. Подобные продукты считаются отличной средой для доставки питательных веществ и биоактивных соединений, таких как витамины, минералы, антиоксиданты, ω -3 жирные кислоты, растительные экстракты, клетчатка, пребиотики и пробиотики.

Производство безалкогольных напитков занимает ключевое место среди направлений пищевой промышленности в России. Главной задачей дан-

ного сектора является обеспечение населения разнообразным выбором неалкогольных напитков [3,4]. В 2022 году производство безалкогольных напитков в стране сократилось на 14%, достигнув 18,7 млрд литров. Данное падение произошло из-за временной приостановки деятельности крупнейших корпораций Coca-Cola и PepsiCo. Производители соков сообщили о недостатке концентратов различных фруктов, производство которых в стране нецелесообразно из-за климатических условий. Также произошла нехватка большинства сиропов, применяемых в производстве безалкогольных напитков [5].

Но уже в 2023 году, рынок производства б/а напитков в России возрос на 6% до 19,8 млрд. литров. Изменения, произошедшие с 2019 по 2023 год представлены на рисунке 1, где можно наблюдать тенденцию роста, не смотря на сокращения в 2022 году. Производителям пришлось изменять рецептуры некоторых напитков, выстраивать новые торговые связи со странами СНГ, но уход иностранных компаний дал возможность отечественным компаниям занять производственную нишу рынка б/а напитков, тем самым увеличив объемы выпуска своей продукции [5].

Яблочный сок, широко потребляемый во всем мире благодаря своему приятному вкусу и питательной ценности, представляет собой прекрасную основу для создания функциональных продуктов [6]. Этот сок от природы богат витаминами, такими как витамин С, минералами и антиоксидантами, что делает его идеальной составляющей для приготовления напитков функционального назначения, приносящих дополнительную пользу для здоровья [7, 8].

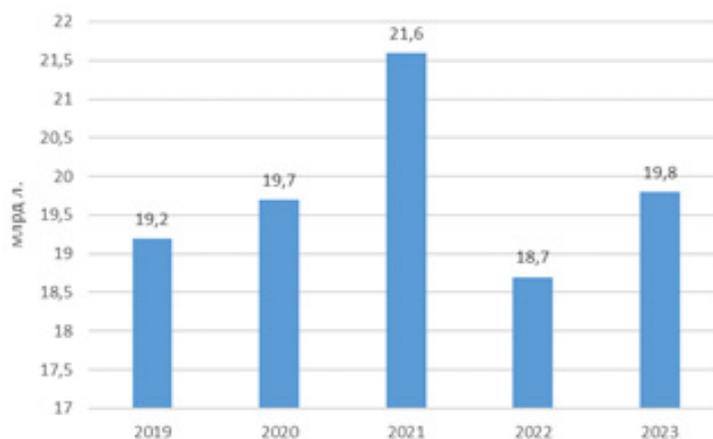


Рисунок 1 – Производство безалкогольных напитков в России в период 2019-2023 гг.

Чтобы сделать продукт ещё более питательным и привлекательным для покупателей, было принято решение применить инновационные методы из сферы молекулярной гастрономии, а конкретно к альгинатной сферификации, процессу, который позволяет инкапсулировать питательные вещества в небольшие сферы, создавая уникальные сенсорные ощущения при

потреблении продукта и обеспечивая в составе дополнительные биоактивные соединения, которые иными методами будет довольно сложно включить [9].

В рамках исследования рассматривались различные ягоды, обладающие высокой биологической ценностью и способные гармонично сочетаться с яблочным соком. Особое внимание

уделялось таким ягодам, как малина, клюква, облепиха и черника, которые являются источниками витаминов, минералов и антиоксидантов. Однако, черная смородина была выбрана в качестве ключевого компонента благодаря ее уникальному химическому составу, высокой концентрации витамина С, полифенолов и антоцианов, а также наиболее гармоничному сочетанию с основой функционального напитка – яблоком, что позволяет создать напиток с выраженными функциональными свойствами и сбалансированным вкусом [10].

Одним из ключевых ингредиентов, который используется в сочетании с яблочным соком, является *Ribes nigrum*, также известный как черная смородина. Эти ягоды обладают высоким содержанием антиоксидантов, особенно витамина С, флавоноидов и антоцианов, которые, оказывают положительное влияние на здоровье сердечно-сосудистой системы и улучшают иммунную. Введение сока черной смородины посредством сферификации не только повышает пищевую ценность напитка, но и позволяет контролируемо высвобождать его полезные компоненты во время употребления, что может повысить эффективность его воздействия на организм [11, 12, 19].

Важно подчеркнуть, что производство функциональных продуктов питания не только отвечает потребностям современного потребителя, но и соответствует стратегиям общественного здравоохранения, направленным на профилактику неинфекционных заболеваний. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) подчеркнула важность правильного питания для снижения подверженности такими заболеваниями, как ожирение, диабет 2 типа, сердечно-сосудистые заболевания и некоторые виды рака [13, 14]. В этом смысле, включение функциональных продуктов в ежедневный рацион может существенно способствовать улучшению качества жизни населения и снижению затрат, связанных с лечением хронических заболеваний.

Таким образом, на основании проведенного литературного обзора целью работы является разработка функционального напитка на основе яблочного сока с использованием альгинатной сферификации сокодержательной мякоти черной смородины и проведение комплексной оценки качества конечного продукта. В ходе исследования планируется повысить пищевую ценность продукта, не ухудшая его органолептические характеристики [15, 16, 19, 20].

Методология. Объектами исследования служат образцы изготовленного функционального напитка по заданной рецептуре:

1) контрольный образец – свежесжатый сок из яблок сорта «Спартан» (300 мл.);

2) образец 1 – свежесжатый сок из яблок сорта «Спартан» (250 мл.) и сферы, изготовленные методом альгинатной сферификации *Ribes nigrum* (50 мл.).

Первоначально были изготовлены экспери-

ментальные образцы по разработанной рецептуре с выделением оптимального варианта. Также было определено оптимальное количество добавляемых в напиток сфер, приготовленных методом альгинатной сферификации.

Далее была проведена оценка качества по органолептическим показателям исследуемых образцов в соответствии с ГОСТ Р 56543-2015 «Напитки функциональные. Общие технические условия» по таким показателям как: внешний вид, цвет, вкус и запах.

Физико-химическая оценка качества напитков определялась по следующим показателям: массовая доля титруемых кислот в соответствии с ГОСТ Р 34127-2017 «Соки фруктовые и овощные. Метод определения титруемой кислотности», массовая доля растворимых сухих веществ в соответствии с ГОСТ ISO 2173-2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ», содержание водорастворимых витаминов в соответствии ОФС 1.2.3.0017.15 «Методы количественного определения витаминов», массовая доля сахаров по ГОСТ 8756.13-87 «Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров», антиоксидантная активность согласно МВИ 02.005-07 «Методика определения антиоксидантной активности пищевых продуктов, продовольственного сырья, БАД и витаминов методом потенциометрии с применением анализатора МПА-1».

Результаты. В рамках выполнения работы первоочередной задачей является подбор сырья для проведения экспериментальных исследований. В качестве основы для разрабатываемого напитка были рассмотрены яблоки сортов «Ред Чиф» и «Спартан», из которых был получен свежесжатый сок.

По собственным результатам органолептического анализа был выбран сорт «Спартан», характеризующийся более выраженным сладким вкусом. Данный выбор обусловлен необходимостью создания оптимального вкусового баланса с сокодержательными сферами из черной смородины, которые являются ключевым витаминсодержащим компонентом разрабатываемого напитка.

В качестве основного сырья для альгинатных сфер была взята черная смородина отборная замороженная, изготовителя ООО «ТК Мираторг» (Россия). Предварительно ягоды были разморожены и из них был получен сок.

Дополнительными ингредиентами, необходимыми для изготовления альгинатных сфер является: порошок лактата кальция, порошок альгината натрия, вода питьевая фильтрованная и вода дистиллированная.

Расчет базовой рецептуры производился из расчета разовой порции объемом 300 мл. При определении оптимального соотношения яблочного сока и сфер с черной смородиной в качестве методологической основы использованы

нормативы суточного потребления витамина С, регламентированные в официальном документе «Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 "Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации"» от 22.07.2021.

Согласно указанным рекомендациям, физиологическая потребность в витамине С составляет:

- для взрослых: 100 мг/сутки;
- для детей: 30-90 мг/сутки.

Содержание витамина С, согласно базе данных «Химический состав пищевых продуктов, используемых в Российской Федерации» [17], в соке черной смородины на 100 мл. ≈ 180 мг.

Такой подход позволил разработать напиток со сбалансированным содержанием витамина С, учитывающим физиологические потребности различных возрастных групп населения. Базовый рецептурный расчет представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет рецептуры напитка на 300 мл

Ингредиенты	Образец 1	Контроль
Напиток		
Свежевыжатый яблочный сок	250 мл	300 мл
Сокодержательная мякоть черной смородины	50 мл	-
Альгинатная сферификация		
Порошок лактата кальция	0,5 г	-
Раствор альгината натрия	1,5 г/300 мл. дист. воды	-
Вода питьевая	150 мл	-

Контрольный образец представляет собой свежевыжатый яблочный сок без добавок.

Образец 1 состоит из 250 мл. свежевыжатого яблочного сока и 50 мл. сока черной смородины, подвергнутого альгинатной сферификации.

Технологический процесс образования сфер состоит в растворении порошка лактата кальция во вкусоароматической жидкости – соке черной смородины и последующем дозировании сока в настоявшийся раствор альгината натрия. Готовые сферы промываются в питьевой воде и готовы к внесению в напиток.

Полученные контрольный и образец №1 проходят контроль качества по органолептическим показателям, а также над ними проводятся исследования по физико-химическим показателям.

Органолептическая оценка разработанных напитков функционального назначения представляет собой важнейший этап исследования, позволяющий определить потребительскую привлекательность продукта. Методология проведения дегустационного анализа основывалась на процедурах согласно ГОСТ 31986-2012 "Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания" и ГОСТ ISO 6658-2016 "Органолептический анализ. Методология. Общие руководящие указания". Дегустационная группа,

состоящая из 7 человек, проводила оценку образцов в оборудованном помещении при дневном освещении и температуре подачи напитков 14±2°С. Каждый образец подвергался тщательному анализу по 5 основным показателям: внешний вид, цвет, вкус, аромат и консистенция (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты дегустационной оценки образцов

Показатель	Внешний вид	Цвет	Вкус и аромат	Консистенция
Образец 1	4,8	4,9	4,8	4,5
Контроль	4,5	4,7	4,7	4,7

Также представлены результаты органолептической оценки образца 1 представлены в таблице 3.

На рисунке 2 представлены полученные альгинатные сферы.

Также была проведена физико-химическая оценка полученных образцов. Физико-химический анализ разработанных напитков функционального назначения представляет собой неотъемлемую часть комплексной оценки качества продукции. Полученные экспериментальные показатели сравнивались с показателями нормативных документов, а именно ГОСТ Р 702.1.003-2020 «Российская система качества. Сок яблочный. Потребительские испытания», так как контрольный образец на 100% состоит из яблочного сока, а образец 1 имеет преобладающие 84% в составе и берется за основу напитка. Итоговые данные из проведенного физико-химического анализа исследуемого образца напитка 1 и контрольного образца представлены в таблице 4. Исследования проводились в двух повторностях, в таблице приведено среднее значение.

Количественное определение витаминов проводилось согласно ОФС 1.2.3.0017.15 «Методы количественного определения витаминов». Результаты данных испытаний представлены в таблице 5 [18]. Исследования проводились в двух повторностях, в таблице приведено среднее значение.

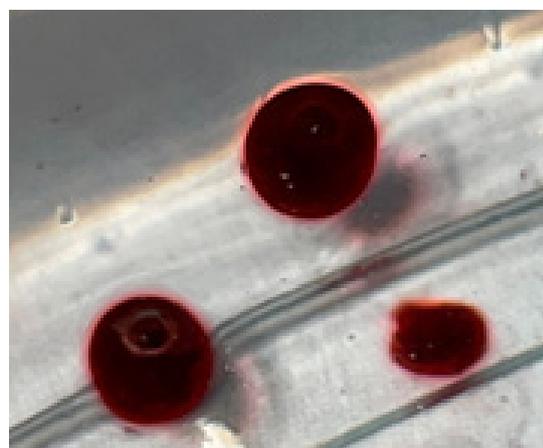


Рисунок 2 – Сферы, полученные методом альгинатной сферификации Ribes nigrum

Таблица 3 – Результаты органолептической оценки образца 1

Наименование показателя	Характеристика требований ГОСТ 32101-2013	Характеристика требований ГОСТ Р 56543-2015	Фактическая характеристика образца 1
Внешний вид	Однородная непрозрачная жидкость с равномерно распределенной тонкоизмельченной мякотью или без неё. Допускается осадок	Непрозрачная жидкость. Допускается наличие осадка и взвесей, обусловленных особенностями используемого сырья, без включений, не свойственных напитку	Однородная непрозрачная жидкость с небольшим осадком яблочного сока и наличием равномерно распределенных сферических включений, свойственных напитку
Цвет	Однородный по всей массе, свойственный цвету фруктов, из которых изготовлен сок	Характерные для напитка конкретного наименования, произведенного из соответствующего сырья, без постороннего привкуса и запаха	Однородный по всей массе, контрастное сочетание светло-янтарного яблочного сока и фиолетовых сфер из <i>Ribes nigrum</i>
Вкус и аромат	Натуральные, хорошо выраженные, свойственные использованному фруктам, прошедшим тепловую обработку. Не допускается посторонние привкус и запах		Натуральные, динамичные с сладковатого яблочного вкуса до кислых смородиновых нот, без постороннего запаха и вкуса

Таблица 4 – Результаты исследований физико-химических показателей образца 1 функционального напитка и контрольного образца

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 702.1.003-2020	Фактические данные	
		Контрольный образец	Образец 1
Массовая доля титруемых кислот (в пересчете на яблочную кислоту), %	Не более 0,8%	0,65±0,2	0,72±0,2
Содержание растворимых сухих веществ, %	Не менее 10%	14±0,2	14,4±0,2
Массовая доля сахаров, %	–	12,35±0,1	12,24±0,1
Антиоксидантная активность, ммоль-экв/л	–	0,445±0,01	4,844±0,01
Показатель pH	Не более 8,0	3,20±0,25	3,6±0,25

Таблица 5 – Результаты исследований содержания водорастворимых витаминов образца 1 функционального напитка и контрольного образца

Витамины	Контроль	Образец 1
Аскорбиновая кислота (C), мкг/100 мл	172±0,1	352±0,1
Пантотеновая кислота (B ₅), мкг/100 мл	99±0,1	213±0,1
Пиридоксин (B ₆), мкг/100 мл	154±0,1	376±0,1
Никотиновая кислота (B ₃), мкг/100 мл	18±0,1	11±0,1
Тиамин (B ₁), мкг/100 мл	14±0,1	54±0,1
Фолиевая кислота (B ₉), мкг/100 мл	37±0,1	101±0,1
Рибофлавин (B ₂), мкг/100 мл	34±0,1	82±0,1

Обсуждение. Результаты органолептической оценки, представленные в таблице 2 и 3, для контрольного образца выявили характерные для яблочного сока показатели качества. Напиток обладал однородной прозрачной консистенцией с незначительным естественным осадком, что соответствует требованиям к свежевыжатым сокам. Цвет контрольного образца характеризовался как светло-янтарный, типичный для яблочного сока без посторонних оттенков. Аромат образца отличался выраженной яблочной нотой, свежестью и натуральностью без посторонних запахов. Вкусовой профиль контрольного образца демонстрировал сбалансированное сочетание кислотности с небольшим преобладанием сладости, характерное для натурального яблочного сока и используемого сорта яблок «Спартан» при приготовлении. Общее впечатление от контрольного образца соответствовало ожиданиям дегустационной группы относительно качественного свежевыжатого яблочного сока.

Образец 1 с применением альгинатной сферификации *Ribes nigrum* продемонстрировал значи-

тельные отличия по органолептическим показателям в сравнении с контрольным образцом. Внешний вид характеризовался наличием равномерно распределенных сферических включений темно-фиолетового цвета диаметром 5-7 мм, взвешенных в прозрачной янтарной основе яблочного сока. Цветовая гамма образца представляла собой контрастное сочетание светло-янтарного яблочного сока и насыщенно-фиолетовых сфер смородинового сока, создавая визуально привлекательный эффект. Аромат образца 1 отличался комплексностью – базовые яблочные ноты дополнялись ягодными оттенками черной смородины, придавая напитку многогранный ягодный профиль. Вкусовые характеристики образца демонстрировали интересную динамику: первоначальный яблочный вкус сменялся яркими кислыми смородиновыми нотами при разрушении сфер во время употребления. Консистенция образца 1 характеризовалась как неоднородная с желеобразными включениями, создающими интересные тактильные ощущения при употреблении.

Сравнительный анализ органолептических по-

казателей исследуемых образцов позволил выявить существенные различия в потребительском восприятии. Образец 1 получил более высокие оценки по показателям внешнего вида и оригинальности вкусового профиля, что объясняется инновационным подходом к структурированию напитка. Контрольный образец превосходил по показателям однородности консистенции и традиционности вкуса, что соответствует классическим представлениям о свежевыжатом соке.

Результаты исследования массовой доли титруемых кислот показали значимые различия между образцами. Контрольный образец характеризовался содержанием титруемых кислот на уровне 0,65%, что соответствует требованиям ГОСТ Р 702.1.003-2020 для яблочного сока прямого отжима. Образец 1 с добавлением сфер из сока черной смородины продемонстрировал повышенное содержание титруемых кислот – 0,72%. Это увеличение обусловлено высоким содержанием органических кислот в соке черной смородины, включая лимонную и яблочную.

Анализ содержания растворимых сухих веществ выявил небольшие различия между образцами. Контрольный образец содержал 14% растворимых сухих веществ, что также соответствует типовым значениям для яблочного сока прямого отжима по ГОСТ Р 702.1.003-2020. В образце 1 наблюдалось незначительное повышение содержания растворимых сухих веществ до 14,4%. Это увеличение обусловлено высоким содержанием сахаров и пектиновых веществ в соке черной смородины, а также процессом сферификации, который способствовал увеличению концентрации растворимых компонентов. Полученные результаты свидетельствуют о повышении пищевой ценности разработанного функционального напитка по сравнению с контрольным образцом, что соответствует заявленным целям исследования.

Сравнительный анализ массовой доли сахаров выявил незначительное снижение этого показателя в образце 1 относительно контрольного. Контрольный образец содержал 12,35% сахаров, а образец с добавлением сфер из сока черной смородины – 12,24%. Разница в 0,11% считается минимальной и статистически несущественной, что подтверждает сохранение общей сладости напитка при применении технологии альгинатной сферификации. Это снижение может быть обусловлено перераспределением сахаров между жидкой и гелеобразной фазами или умеренным разбавлением основного сока компонентами сфер.

Наиболее значимые различия между образцами наблюдаются в показателях антиоксидантной активности. В контрольном образце антиоксидантная активность составила 0,445 ммоль-экв/л, в то время как в образце 1 она значительно возросла до 4,844 ммоль-экв/л. Это увеличение в 11 раз указывает на значительный функциональный потенциал разработанного напитка. Такой существенный

рост антиоксидантной активности обусловлен добавлением сока черной смородины, богатого антиоксидантами, такими как антоцианы, фенольные соединения, витамины С и Е. Технология альгинатной сферификации способствовала сохранению и стабилизации этих биологически активных веществ.

Показатель *pH* исследуемых образцов также продемонстрировал различия. Контрольный образец имел значение *pH* 3,2, что соответствует типичному уровню для яблочного сока. В образце 1 был зафиксирован более высокий уровень *pH* – 3,6. Это изменение может быть связано с особенностями состава смеси, включающей сокодержательную мякоть черной смородины, и влиянием процесса альгинатной сферификации. Полученные значения находятся в допустимом диапазоне для фруктовых напитков, что подтверждает их стабильность при хранении.

Анализ результатов исследований содержания водорастворимых витаминов в разработанном функциональном напитке демонстрирует значительное повышение концентрации большинства исследуемых витаминов в образце 1 по сравнению с контрольным образцом.

Наиболее существенное увеличение наблюдается в содержании пиридоксина (витамин B_6), количество которого возросло с 154 до 376 мкг/100 мл, что составляет прирост в 144%. Аскорбиновая кислота (витамин С) также демонстрирует значительное увеличение – с 172 до 352 мкг/100 мл, что соответствует приросту в 105%. Содержание пантотеновой кислоты (витамин B_5) увеличилось на 115%, достигнув значения 213 мкг/100 мл в образце 1 против 99 мкг/100 мл в контрольном образце.

Особого внимания заслуживает повышение концентрации тиамин (витамин B_1), которое составило 286% – с 14 до 54 мкг/100 мл. Содержание фолиевой кислоты (витамин B_9) возросло с 37 до 101 мкг/100 мл, что соответствует приросту в 173%. Рибофлавин (витамин B_2) также продемонстрировал существенное увеличение – с 34 до 82 мкг/100 мл, что составляет прирост в 141%.

Выводы. Создание новых функциональных напитков с использованием современных технологий и натуральных ингредиентов является актуальной задачей для пищевой промышленности и одним из направлений является разработка напитков с повышенным содержанием витаминов и других биологически активных веществ за счет применения инновационных методов, таких как альгинатная сферификация, благодаря которому появляется возможность в удобной и практичной форме сочетать два и более богатых витаминами натуральных экстрактов ягод и плодов.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой функциональности разработанного напитка. Значительное увеличение содержания витаминов С, B_5 , B_6 , B_1 , B_9 и B_2 подтверждает эффективность выбранной технологии и обеспечивает повышен-

ную пищевую ценность продукта. Обогащение напитка водорастворимыми витаминами способствует усилению его антиоксидантных свойств, положительному влиянию на иммунную систему и общему укреплению здоровья потребителей.

Авторы выражают благодарность студенту гр. ПБ-21-1 Уральского государственного экономического университета Вичевскому Максиму Эдуардовичу за неоценимую помощь в проведении лабораторно-практических испытаний разработанного напитка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Продукты пищевые функциональные. Ингредиенты пищевые функциональные. Классификация и общие требования: ГОСТ Р 54059-2010: нац. стандарт: дата введения 2012-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
2. Напитки функциональные. Общие технические условия: ГОСТ Р 56543-2015: нац. стандарт: дата введения 2016-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 11 с.
3. Менжулина, М.Е. Анализ отрасли безалкогольных напитков по России / М.Е. Менжулина, Г.Т. Анурова // Социальное и экономическое развитие АТР: проблемы, опыт, перспективы: материалы научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 20-28 апреля 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет, 2023. – С. 89-97.
4. Колесниченко Б.К. Напитки функционального назначения как мировая тенденция / Б.К. Колесниченко, А.А. Ляхова // Проблемы аграрной науки. – 2024. – №1. – С. 43-49.
5. Анализ рынка прохладительных напитков в России в 2019-2023 гг, прогноз на 2024-2028 гг. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://businessstat.ru/images/demo/cold_drinks_russia_demo_businessstat.pdf.
6. Рынок яблок в России и мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pbs72.ru/articles/mneniya/rynok-yablok-v-rossii-i-mire/>.
7. Vallée M.B. Health Benefits of Apple Juice Consumption: A Review of Interventional Trials on Humans / M.B. Vallée, M. Verheyde, S. Pomerleau, A. Doyen, C. Couillard, // *Nutrients*. – 2022. – P. 14.
8. Jackson C, Shukla V, Kolba N, Agarwal N, Padilla-Zakour OI, Tako E. Empire Apple (*Malus domestica*) Juice, Pomace, and Pulp Modulate Intestinal Functionality, Morphology, and Bacterial Populations In Vivo (*Gallus gallus*). *Nutrients*. 2022 Nov 22;14(23):4955. doi: 10.3390/nu14234955. PMID: 36500984; PMCID: PMC9735615.
9. Abtahi, S. A., Khoshkhoo, Z., Khorshidian, N., & Mohammadi, M. (2024). Alginate Microcapsules Loaded with Eryngium billardieri Extract and Its Application in Apple Juice. *Journal of Food Quality*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/6858230>.
10. Vidović BB, Milinčić DD, Marčetić MD, Djuriš JD, Plić TD, Kostić AŽ, Pešić MB. Health Benefits and Applications of Goji Berries in Functional Food Products Development: A Review. *Antioxidants (Basel)*. 2022 Jan 27;11(2):248. doi: 10.3390/antiox11020248. PMID: 35204130; PMCID: PMC8868247.
11. Колесниченко Б.К. Напитки функционального назначения как мировая тенденция / Б.К. Колесниченко, А.А. Ляхова // Проблемы аграрной науки. – 2024. – №1. – С. 43-49.
12. Milić A, Daničić T, Tepić Horecki A, Šumić Z, Teslić N, Bursać Kovačević D, Putnik P, Pavlić B. Sustainable Extractions for Maximizing Content of Antioxidant Phytochemicals from Black and Red Currants. *Foods*. 2022 Jan 24;11(3):325. doi: 10.3390/foods11030325. PMID: 35159476; PMCID: PMC8833918.
13. Медведев, О. Здоровое питание Современные научные рекомендации по здоровому питанию и их влияние на пищевую промышленность / О. Медведев, З. Медведева // СФЕРА: Масложировая индустрия. Масла и жиры. – 2017. – № 2(3). – С. 38-41. – EDN ZUIHGX.
14. Agrawal R.S. Phytochemicals as bioactive ingredients for functional foods / R.S. Agrawal, R.C. Ranveer, N.B. Rathod, Nilesh Prakash Nirmal, // *Recent Frontiers of Phytochemicals*. – 2023. – P. 95-108.
15. Lagopati N, Pavlatou EA. Advanced Applications of Biomaterials Based on Alginic Acid. 2020 - 9(1). *AJBSR*. MS.ID.001350. DOI:10.34297/AJBSR.2020.09.001350.
16. Rabadán A, Nieto R, Bernabéu R. Food Innovation as a Means of Developing Healthier and More Sustainable Foods. *Foods*. 2021 Sep 1;10(9):2069. doi: 10.3390/foods10092069. PMID: 34574178; PMCID: PMC8469803.
17. Информационно-аналитическая система ФГБУ "НИИ питания" РАМН: База данных "Химический состав пищевых продуктов, используемых в Российской Федерации" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://web.ion.ru/food/FD_tree_grid.aspx/, свободный.
18. Методы количественного определения витаминов: ОФС 1.2.3.0017.15: Общая фармакопейная статья: дата введения 2016-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 14 с.
19. Лазарев, В.А. Разработка изотонического напитка, обогащенного изолятом сывороточного белка и витаминным премиксом / В.А. Лазарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 31-40. – DOI 10.14529/food240304. – EDN PFBABU.
20. Школьникова, М.Н. Микрокапсулирование полифенолов как способ повышения их биодоступности в составе пищевых систем: обзор современных технологий / М.Н. Школьникова, Е.В. Воронова // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 90-98. – DOI 10.29141/2500-1922-2021-6-2-11. – EDN YRZHLR.

Статья поступила в редакцию 08.09.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 664.6/.7

EDN: PELPL

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗЕРНОВЫХ И БОБОВЫХ КУЛЬТУР В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ

© Автор 2025

SPIN: 7092-6913

AuthorID: 967939

ORCID: 0000-0003-0141-1998

ScopusID: 57208213064

ФРОЛОВА Нина Анатольевна, доктор технических наук,

доцент, профессор кафедры «Инжиниринга технологического оборудования»

Калининградский государственный технический университет

(236022, Россия, г. Калининград, пр-т. Советский 1, e-mail: ninelfr@mail.ru)

Аннотация. Зерновые и бобовые культуры всё чаще применяются в технологиях пищевых продуктов с целью повышения биологической ценности, снижения себестоимости изделий и создания продуктов функционального назначения, например для потребителей, страдающих таким заболеванием, как целиакия. Зерновые и бобовые культуры относительно дешевле мяса, они, как правило, очень питательны и содержат мало насыщенных жиров. Кроме того, смеси злаковых и бобовых в достаточных пропорциях могут обеспечить организм необходимыми аминокислотами с высокой усвояемостью белка. Так, смесь бобовых и злаковых обеспечивает организм незаменимыми аминокислотами и имеет 80%-ную усвояемость. Среди бобовых и злаковых культур, на территории Калининградской области наибольшее распространение получили зерно пшеницы (*Triticum*), бобы гороха (*Pisum*), семена нута (*Cicer arietinum*), бобы белого люпина (*Lupinus albus*). При этом к классическим компонентам пищевых систем относят *Triticum*, *Pisum* и *Cicer arietinum*. Результаты анализа химического состава бобовых и злаковых культур, собранных на территории Калининградской области в период 2022-2024 гг. установил, что наибольшее содержание белка и сырой клетчатки отмечается в муке из *Lupinus albus* - 34,6±3,2 % и 16,2±0,8 % соответственно. По содержанию крахмала доминирует экспериментальный образец из муки *Pisum*, при этом в муке из *Lupinus albus* крахмал не идентифицирован. Так как бобы *Lupinus albus* в основном применяются при кормопроизводстве, представлялось интересным изучить подробный химический его состав для определения возможности введения в пищевые системы. Установлено, что состав белковых фракций муки из бобов *Lupinus albus* включает 33 % альбумина, 48,97 % глобулина и 19,24 % глютелина. Наиболее распространенным сахаром в муке из бобов *Lupinus albus* является сахароза - 70,7 % от общего количества сахаров. Количество моно- и дисахаридов при этом составляет около 5,82 %. Другим важным питательным веществом, содержание которого в муке из бобов *Lupinus albus* также варьируется, являются липиды. Состав жирных кислот представлен 13,5 % насыщенными, 55,4 % мононенасыщенными и 31,1 % полиненасыщенными жирными кислотами. Для использования продуктов переработки бобов *Lupinus albus* в пищевых системах необходим процесс предварительной тепловой обработки для минимизации его антипитательных свойств. Использование муки из бобов *Lupinus albus* и зерновых культур *Triticum*, *Pisum* и *Cicer arietinum* в пищевых системах будет способствовать повышению их пищевой ценности и расширению ассортимента в том числе безглютеновых продуктов питания.

Ключевые слова: люпин, бобовая, зерновая культура, переработка, мука, химический состав, антипитательные вещества.

USE OF CEREALS AND LEGUMINOUS CROPS IN FOOD SYSTEMS

©The Author 2025

FROLOVA Nina Anatolyevna, doctor of technical sciences, associate professor,

professor of the department of «Engineering of Technological Equipment»

Kaliningrad State Technical University

(236022, Russian Federation, Kaliningrad, Sovetsky Ave. 1, e-mail: ninelfr@mail.ru)

Abstract. Cereals and legumes are increasingly used in food processing to enhance their biological value, reduce production costs, and create functional products, such as for consumers with celiac disease. Cereals and legumes are relatively cheaper than meat, are generally highly nutritious, and contain little saturated fat. Furthermore, mixtures of cereals and legumes in sufficient proportions can provide the body with essential amino acids and high protein digestibility. Thus, a mixture of legumes and cereals provides the body with essential amino acids and has 80% digestibility. Among the legumes and cereals, the most common in the Kaliningrad region are wheat grain (*Triticum*), pea beans (*Pisum*), chickpea seeds (*Cicer arietinum*), and white lupine beans (*Lupinus albus*). *Triticum*, *Pisum*, and *Cicer arietinum* are considered classic components of food systems. An analysis of the chemical composition of legumes and cereals collected in the Kaliningrad region between 2022 and 2024 revealed that *Lupinus albus* flour had the highest protein and crude fiber content - 34.6±3.2% and 16.2±0.8%, respectively. The experimental sample of *Pisum* flour had the highest starch content, while no starch was identified in *Lupinus albus* flour. Since *Lupinus albus* beans are primarily used in feed production, a detailed chemical study was needed to determine the potential for their introduction into food systems.

The protein fractions of *Lupinus albus* flour were found to include 33% albumin, 48.97% globulin, and 19.24% glutelin. Sucrose is the most common sugar in *Lupinus albus* flour, accounting for 70.7% of the total sugar content. The content of mono- and disaccharides is approximately 5.82%. Lipids are another important nutrient, the content of which also varies in *Lupinus albus* bean flour. The fatty acid composition is 13.5% saturated, 55.4% monounsaturated, and 31.1% polyunsaturated. For the use of *Lupinus albus* bean products in food systems, a pre-heat treatment process is necessary to minimize their antinutritional properties. The use of flour from *Lupinus albus* beans and the cereals *Triticum*, *Pisum*, and *Cicer arietinum* in food systems will contribute to increasing their nutritional value and expanding the range of food products, including gluten-free ones.

Keywords: lupine, legume, grain crop, processing, flour, chemical composition, antinutritional factors.

Для цитирования: Фролова Н.А. Использование зерновых и бобовых культур в пищевых системах / Н.А. Фролова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 128-132. – EDN: IIELPL.

Введение. Мировое сообщество претерпевает глобальные изменения в продовольственном секторе. Относительно потребления белкового компонента наметилась устойчивая тенденция замены белка животного происхождения растительными источниками (Ohanenye, I.C. [1], Jarzaguet M. [2], Hoehnel A., Zannini E., Arendt E.K. [3]). Зерновые и бобовые культуры всё чаще применяются в технологиях пищевых продуктов с целью повышения биологической ценности, снижения себестоимости изделий и создания продуктов функционального назначения, например для больных целиакией (Беликова М.П. [4]). Зерновые и бобовые культуры относительно дешевле мяса, они, как правило, очень питательны и, в отличие от мяса, содержат мало жира и насыщенных жиров (Корбут Л.В., Соболев К.Н. [5]). Кроме того, смеси злаковых и бобовых в достаточных пропорциях могут обеспечить организм необходимыми аминокислотами с высокой усвояемостью белка. Так, смесь бобовых и злаковых обеспечивает организм незаменимыми аминокислотами и имеет 80%-ную усвояемость (Косенко Т.Г. [6]). Белок имеет доминирующее значение в питании человека. Технологии производства растительного и животного белка отличаются друг от друга и оказывают разное влияние на окружающую среду. Выращивание растительного белка является менее ресурсоемким и более экологически чистым процессом. С другой стороны, биологическая ценность животного белка превалирует над растительным (Якимович Е.А. [7]). Необходимо искать баланс в потреблении белка растительного и животного происхождения. Учитывая отечественные достижения науки, наблюдаются перспективы увеличения доли употребления высококачественного растительного белка. Пищевую ценность растительного белка можно регулировать комбинированием сырья с разным аминокислотным составом. Многообразие факторов, влияющих на усвоения белковой пищи, диктуют мировому обществу использование комплексного подхода к производству новых высокобелковых продуктов питания.

Применение обработки высокобелкового растительного сырья позволяют повысить доступность

белковых компонентов в пищеварительной системе человека (Шкрабтак Н.В., Праскова Ю.А., Фролова Н.А., Кирсанов А.Д. [8], Дубинкина Е. А., Беляев Н.Н. [9]).

Среди бобовых и злаковых культур, на территории Калининградской области наибольшее распространение получили зерно пшеницы (*Triticum*), бобы гороха (*Pisum*), семена нута (*Cicer arietinum*), бобы белого люпина (*Lupinus albus*). При этом к классическим компонентам пищевых систем относят *Triticum*, *Pisum* и *Cicer arietinum*.

Lupinus albus – бобовое однолетнее растение, достигающее до 45 см в высоту (Егорова Г.П., Шеленга Т.В., Проскурикова Г.И. [10], Милехина Н. В., Дьяченко В. В., Сазонова И.Д. [11]). Листья этого растения состоят из семи листочков, расположенных на той же высоте, что и черешок, а цветки могут быть белыми, синими или желтыми (Андрианова Е.Н., Кривопишина Л.В., Чванова О.А., Цыгуткин А.С. [12]). Бобы *Lupinus ssp.* являются высокобелковой культурой с содержанием белка (40-50%), общего жира (10%-15%), преобладанием ненасыщенных жирных кислот и богатым содержанием витаминов и минеральных компонентов и по химическому составу являются прототипом сои (Милехина Н.В., Дьяченко В.В., Сазонова И.Д. [11]). Бобы *Lupinus albus* реже используют в пищевых технологиях. В основном данный рецептурный компонент входит в состав кормов для животных за счет высокого содержания белка, пищевая ценность которого зависит от состава аминокислот, усвояемости, «биодоступности» незаменимых аминокислот, отсутствия токсичности и антипитательных факторов (Андрианова Е.Н., Кривопишина Л.В., Чванова О.А., Цыгуткин А.С. [12], Анисимова Н.В., Сысолятин Е.Н., Крицкий М.Н. [13], Киселева Т.Л., Киселева М.А., Кочеткова А.А. [14]). Поэтому представлялось интересным провести анализ химического состава и определить возможность введения бобовых и злаковых культур, в частности *Triticum*, *Pisum*, *Cicer arietinum*, *Lupinus albus* в пищевые системы. Эффективность разрушения антипитательных веществ зависит от ряда параметров. С одной стороны, оказывают влияние сортовые особенности сырья, в том числе морфологическое строение тканей, особенности

химического состава культуры, и, с другой стороны, параметры технологической обработки (вид, время, продолжительность) (Киселева Т.Л., Шарафетдинов Х.Х., Плотникова О.А. [15], Шкрабтак Н. В., Праскова Ю.А., Фролова Н.А. [16], Акритиду Х. П., Бойник В.В. [17]). Наиболее эффективными методами борьбы с антипитательными веществами является автоклавирование и варка. Также комбинирование различных видов обработки показывает положительное влияние на антипитательные компоненты (Глотова И.А., Рязанцева О.А., Галочкина Н.А., Куцова А.Е. [18]).

Цель работы – провести анализ химического состава бобовых и злаковых культур, собранных на территории Калининградской области в период 2022-2024 гг. и определить возможность их использования в пищевых системах.

Методология. При анализе химического состава бобовых и злаковых культур использовали метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), при этом основными параметрами работы явились следующие характеристики: длина волны – 254 нм; время интегрирования – 0,40с; расходом элюента – без термостата колонок – 0,1 см³/мин.; с термостатом колонок на 350°C – 37±1 – 0,15 см³/мин.; объем пробы – 0,002 см³(мкл); объем элюента – 1,8 см³; объем регенерации колонки – 0,4 см.

В ходе проведения эксперимента была получена мука из очищенных от оболочки бобовых и злаковых культур, измельченных в шлифовальной турбомельнице до мелкодисперсного состояния с размером частиц 0,02 мкм. Для снижения антипитательных свойств бобы *Lupinus albus* предварительно подвергали тепловой обработке (обжариванием) при температуре 120°C в течение 1 часа с регулярным перемешиванием.

Содержание сахара в муке из бобов *Lupinus albus* анализировали йодометрическим методом до полного окисления альдегидной группы сахаров в щелочной среде.

Содержание белка определяли рефрактомет-

рическим методом со шкалой массовой доли белка в диапазоне 0-15%, основанным на способности повышать кислотность нейтрального водного раствора аминокислот в присутствии нейтрального формалина, в которых оба водорода аминогруппы замещаются метильной группой.

Так как жирные кислоты содержатся в пищевых продуктах в виде триацилглицеринов и свободных жирных кислот, для уменьшения адсорбции растворенных веществ и улучшения разделения соединений был осуществлен процесс перевода веществ с большей летучестью, который состоял из двух этапов: первый – извлечение масла методом экстракции с использованием метода Сокслета и петролейного эфира в течение 6 часов с температура кипения петролейного эфира – 60-65°C; второй – этерификация, в ходе которой жирные кислоты преобразовались в более летучие соединения, такие как метиловые эфиры жирных кислот. Исследования проводили в усредненной пробе (из пяти проб в 3-кратной повторности). Статистически полученные результаты обрабатывали при помощи пакета прикладных программ *STATISTICA 10* путем генеральной совокупности с помощью модуля *Basic Statistics*.

Результаты. В таблице 1 представлены данные по химическому составу злаковых и бобовых культур, произрастающих на территории Калининградской области.

Что касается содержания витаминов то в муке из бобов *Lupinus albus* ниацин присутствует в большем количестве, а тиамин в меньшем. Несмотря на высокое содержание белков и липидов, включение в пищевые системы продуктов переработки бобовых культур, в том числе *Lupinus albus* сопряжено с большими трудностями из-за наличия в них антипитательных факторов, таких как алкалоиды, дубильные вещества, ингибиторы протеазы, альфа-галактозиды (раффиноза, стахиоза) и т.д., которые отрицательно влияют на усвояемость и биодоступность белка.

Таблица 1 – Химический состав злаковых и бобовых культур собранных на территории Калининградской области в период 2022-2024 гг.

Компоненты, %	Зерно пшеницы (<i>Triticum</i>)	Бобы гороха (<i>Pisum</i>)	Семена нута (<i>Cicer arietinum</i>)	Бобы белого люпина (<i>Lupinus albus</i>)
Белок	12,0±1,2	24,2±1,0	22,4±2,6	34,6±3,2
Крахмал	69,0±1,6	51,4±4,4	41,2±5,4	–
Зола	1,8±0,4	3,6±0,4	3,2±0,4	3,8±0,6
Сырая клетчатка	2,5±0,4	6,2±0,2	10,8±1,0	16,2±0,8

В данном случае применение высоких температур является одним из основных методов устранения антипитательных факторов в бобовых культурах, в том числе в *Lupinus albus*.

Тепловая обработка бобовых культур может включать в себя такие методы, такие как экструзия, автоклавирование, обжаривание горячим воздухом или паром, варка и обработка в микроволновой печи, что приводит к денатурации белков лектинов,

ингибиторов протеазы и инактивации фитиновой кислоты (Хамицаева А.С., Исригова Т.А., Будаев Ф.И. [19], Вертипрахов В.Г. и др. [20]).

Ингибиторы протеазы – это белки, широко распространенные в растительном мире, способные ингибировать активность трипсина, химотрипсина, амилазы и карбоксипептидазы. Исследования ингибиторов протеазы были сосредоточены в основном на ингибиторах трипсина, обнаруженных

в семенах бобовых, в частности в соевых бобах, которые предположительно ответственны за низкую пищевую ценность сырых бобовых культур. Ингибиторы протеазы ускоряют секрецию ферментов посредством механизма обратной связи через холецистокинин. В норме количество ферментов, секретлируемых поджелудочной железой, регулируются содержанием белка в просвете кишечника. Трипсин связывается с белками до тех пор, пока его не станет слишком много, после чего свободный трипсин посылает сигнал поджелудочной железе снизить синтез трипсиногена. Когда ингибитор связывается с трипсином, секреция трипсиногена поджелудочной железой увеличивается. Это приводит к гипертрофии поджелудочной железы.

Обсуждение. Анализ данных таблицы 1 свидетельствует о том, что наибольшее содержание белка и сырой клетчатки отмечается в муке из *Lupinus albus*, что составляет 34,6±3,2 % и 16,2±0,8 % соответственно. Белки в пищевых системах способны проявлять эмульгирующие свойства, способствуя стабилизации частиц жира в эмульсионных системах с хорошими вкусовыми качествами. По содержанию крахмала доминирует экспериментальный образец из муки *Pisum*, при этом в муке из *Lupinus albus* крахмал не идентифицирован.

Подбор оптимальных температурных факторов для нейтрализации антипитательных свойств при максимальном сохранении пищевой ценности бобовых культур является важным аспектом. Бобы *Lupinus albus* содержат алкалоиды хинолизидинового ряда, идентифицированные как лупанин, спартеин, лупинин, изолупанин, ангустифолин и L-17-гидроксилупанин, причем первые два являются наиболее токсичными. Так, избыточное воздействие тепловых факторов может повлиять на качество белка, окисляя серу в цистине и метионине, а также вызывая реакцию Майяра между аминокислотной группой лизина и углеводами.

В ходе проведения исследований с целью устранения и ингибирования антипитательных факторов бобов *Lupinus albus* с помощью различных видов термической обработки было обнаружено, что термическая обработка при температуре 100°C кипячением в течение 12 часов значительно снижает горький вкус водного экстракта *Lupinus albus*, полученного путем смешивания муки из бобов *Lupinus albus* с водой (гидромодуль 1:4) вызванный наличием алкалоидов. Эффективность применяемой обработки оценивали путем определения активности фермента уреазы по разнице pH до и после термической обработки, поскольку этот фермент инактивируется при тех же температурах что разрушение антипитательных факторов.

При оценке термической обработки для инактивации антипитательных факторов в муке из бобов *Lupinus albus* использовал автоклавирование при температуре 121°C в течение 5, 10, 15 и 25 минут и отметил, что эти процедуры были эффективны

для инактивации большинства антипитательных факторов, таких как ингибиторы трипсина и лектины без существенных потерь в аминокислотном составе.

Выводы. Среди бобовых и злаковых культур, на территории Калининградской области наибольшее распространение получили зерно пшеницы (*Triticum*), бобы гороха (*Pisum*), семена нута (*Cicer arietinum*), бобы белого люпина (*Lupinus albus*). При этом к классическим компонентам пищевых систем относят *Triticum*, *Pisum* и *Cicer arietinum*. Результаты анализа химического состава бобовых и злаковых культур, собранных на территории Калининградской области в период 2022-2024 гг. установил, что наибольшее содержание белка и сырой клетчатки отмечается в муке из *Lupinus albus* – 34,6±3,2% и 16,2±0,8% соответственно. По содержанию крахмала доминирует экспериментальный образец из муки *Pisum*, при этом в муке из *Lupinus albus* крахмал не идентифицирован. В ходе проведения исследований установлено, что состав белковых фракций муки из бобов *Lupinus albus* включает 33% альбумина, 48,97% глобулина и 19,24% глютелина. Наиболее распространенным сахаром в бобах *Lupinus albus* является сахароза – 70,7% от общего количества сахаров. Количество моно- и дисахаридов в муке составляет около 5,82 %. Другим важным питательным веществом, содержание которого в муке из бобов *Lupinus albus* также варьируется, являются липиды. Состав жирных кислот представлен 13,5% насыщенными, 55,4% мононенасыщенными и 31,1% полиненасыщенными жирными кислотами. Для использования продуктов переработки бобов *Lupinus albus* в пищевых системах необходим процесс предварительной тепловой обработки для минимизации антипитательных свойств. Использование бобов *Lupinus albus* в пищевых системах будет способствовать повышению их пищевой ценности и расширению ассортимента безглютеновых продуктов питания. Так, частичная замена таких рецептурных компонентов, как пшеничная мука на муку из бобов *Lupinus albus* в дозировке от 2% до 15% будет способствовать повышению пищевой ценности мучных кондитерских и хлебобулочных изделий. В свою очередь полная замена пшеничной муки в пищевых системах (при производстве подливо, соусов, кондитерских изделий) расширит ассортимент безглютеновых продуктов питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ohanenye, I.C., Tsopmo, A., Ejike, C.E.C.C, Udenigwe, C.C. Germination as a bioprocess for enhancing the quality and nutritional prospects of legume proteins // Trends Food Sci. 2020. Tech. 101, pp. 213-222.
2. Jarzaguet M., Polakof S., David, J., Migné C., Joubrel G., Efstathiou, T. A meal with mixed soy/whey proteins is as efficient as a whey meal in counteracting the age-related muscle anabolic resistance only if the protein content and leucine levels are increased // Food Funct. 2018. 9(12), pp. 6526-6534.
3. Hoehnel A., Zannini E., Arendt E.K. Targeted formulation of plant-based protein-foods: Supporting the food system's trans-

formation in the context of human health, environmental sustainability and consumer trends // Trends Food Sci. Tech. 2022. pp. 128, 238-252.

4. Беликова М.П. Анализ динамики урожайности зерновых сельскохозяйственных культур в Российской Федерации // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. – 2022. – № 5-6. – С. 107-114.

5. Корбут Л.В., Соболев К.Н. К вопросу управления рисками в региональных агропродовольственных системах // Агропанорама. – 2022. – № 3(151). – С. 39-43.

6. Косенко Т.Г. Оценка эффективности производства зерновых культур // Актуальные вопросы науки. – 2018. – № 41. – С. 145-147.

7. Якимович Е.А. Трансформация трактовок продовольственной безопасности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экономика. – 2023. – Т. 31. – № 1. – С. 91-106.

8. Шкрабтак Н.В., Праскова Ю.А., Фролова Н.А., Кирсанов А.Д. Исследование пищевой ценности печенья, полученного на основе пшеничной и овсяной муки // Пищевая промышленность. – 2024. – № 3. – С. 35-37.

9. Дубинкина Е.А., Беляев Н.Н. Люпин белый и люпин узколистный в условиях Тамбовской области // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2018. – № 1(25). – С. 103-106.

10. Егорова Г.П., Шеленга Т.В., Проскурикова Г.И. Биохимическая характеристика семян люпина // Масла и жиры. – 2020. – № 1-2. – С. 28-31.

11. Милехина Н.В., Дьяченко В.В., Сазонова И.Д. Изучение сортов люпина узколистного на продуктивность в условиях Брянской области // Вестник Брянской ГСХА. – 2023. – № 6(100). – С. 42-47.

12. Андрианова Е.Н., Кривопишина Л.В., Чванова О.А., Цыгуткин А.С. Природный источник марганца - белый люпин // Птица и птицепродукты. – 2015. – № 5. – С. 47-49.

13. Анисимова Н.В., Сысолятин Е.Н., Крицкий М.Н. Изучение исходного материала люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.) по алкалоидности семян // Земледелие и селекция в Беларуси. – 2021. – № 57. – С. 325-333.

14. Киселева Т.Л., Киселева М.А., Кочеткова А.А. Пшеница: возможности и потенциальные риски использования при сахарном диабете с позиции традиционной медицины и современной диетологии // Традиционная медицина. – 2018. – № 2(53). – С. 4-16.

15. Киселева Т.Л., Шарафетдинов Х.Х., Плотнокова О.А. Зерновые в лечебном питании при сахарном диабете 2 типа с позиции современной и традиционной диетологии // Традиционная медицина. – 2018. – № 3(54). – С. 40-52.

16. Шкрабтак Н.В., Праскова Ю.А., Фролова Н.А. Перспективы применения шелушительно-шлифовальной машины для получения муки из *Sorghum bicolor* // Пищевая промышленность. – 2024. – № 2. – С. 72-74.

17. Акритиду Х.П., Бойник В.В. Корни люпина многолистного перспективный источник биологически активных веществ // Молодежный инновационный вестник. – 2015. – Т. 4. – № 1. – С. 391.

18. Глотова И.А., Рязанцева О.А., Галочкина Н.А., Куцова А.Е. Семена люпина – альтернатива сое в формировании потребительских свойств продовольственных товаров // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2019. – № 2. – С. 69-79.

19. Хамицаева А.С., Исригова Т.А., Будаев Ф.И. Технология производства пищевой добавки из дикорастущего растения люпина // Известия Дагестанского ГАУ. 2022. – № 4(16). – С. 317-321.

20. Вертипрахов В.Г., Сергеевкова Н.С., Беззубенко Д.Д., Полина И.С. Новый способ определения вкусовых и питательных свойств белого люпина в кормах цыплят-бройлеров // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 4(205). – С. 61-68.

Статья поступила в редакцию 05.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 663.8.03
EDN: MFFCAK

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ ГОДНОСТИ НАПИТКОВ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 1159-9086
AuthorID: 1094944
ORCID: 0000-0002-6976-7299

БАГМУТ Юлия Николаевна, аспирант

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: bagmut1980@gmail.com)

SPIN: 9236-8303
AuthorID: 706228
ORCID: 0000-0002-8618-8301

КОКОРЕВА Лариса Анатольевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии питания

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: lariko77@mail.ru)

SPIN: 5442-4264
AuthorID: 525546
ORCID: 0000-0001-5458-856

ЗАВОРОХИНА Наталия Валерьевна, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технологии питания

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: ip@usue.ru)

Аннотация. Статья посвящена перспективам применения технологии высокого гидростатического давления (*HPP*) в пищевой промышленности, рассматривая её как нетепловую альтернативу пастеризации для увеличения сроков годности пищевых напитков. Основное внимание уделено механизму инактивации микроорганизмов и ферментов под воздействием *HPP*. Согласно представленным данным, обработка давлением в диапазоне 300-350 МПа продолжительностью 3 минуты обеспечивает высокую эффективность инактивации патогенов, обеспечивая микробиологическую безопасность и продлевая сроки хранения соков и функциональных напитков до 30 суток без значительных потерь органических компонентов и биологической активности. Анализируя воздействие *HPP* на пищевые напитки, подчеркивается значительное преимущество данной технологии перед традиционным нагреванием, которое часто сопровождается потерей витаминов, минеральных веществ и естественного вкуса продуктов. Подтверждено, что технология *HPP* сохраняет первоначальные органолептические характеристики напитков, предотвращая изменения вкуса, цвета и запаха. Исследование подтверждает, что использование *HPP*-технологии представляет собой эффективный способ продления сроков годности белковых напитков, улучшения их микробиологического профиля и сохранения ценных нутриентов, делая этот метод привлекательным для производителей, стремящихся предложить своим потенциальным клиентам качественные и полезные продукты.

Ключевые слова: высокое гидростатическое давление, *HPP*, срок годности, пастеризация, напитки, микробиология, качество, витамины.

APPLICATION OF HIGH HYDROSTATIC PRESSURE (HPP) TECHNOLOGY TO EXTEND THE SHELF LIFE OF BEVERAGES

© The Author(s) 2025

BAGMUT Yulia Nikolaevna, graduate student

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya street, 62/45, e-mail: bagmut1980@gmail.com)

KOKOREVA Larisa Anatolyevna, candidate of technical sciences, associate professor,
department of food technology, Institute of management, entrepreneurship and engineering

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya street, 62/45, e-mail: lariko77@mail.ru)

ZAVOROKHINA Natalia Valerievna, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Department of Food Technology

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya street, 62/45, e-mail: 1@edtd.ru)

Abstract. The article is devoted to the prospects for the use of high hydrostatic pressure (*HPP*) technology in the food industry, considering it as a non-thermal alternative to pasteurization to increase the shelf life of food beverages.

The main attention is paid to the mechanism of inactivation of microorganisms and enzymes under the influence of HPP. According to the presented data, pressure treatment in the range of 300-350 MPa for 3 minute ensures high efficiency of pathogen inactivation, ensuring microbiological safety and extending the shelf life of juices and functional drinks to 30 days without significant losses of organic components and biological activity. Analyzing the impact of HPP on food beverages, the significant advantage of this technology over traditional heating, which is often accompanied by the loss of vitamins, minerals and natural taste of products, is emphasized. It has been confirmed that *HPP* technology preserves the original organoleptic characteristics of drinks, preventing changes in taste, color and smell. The study confirms that the use of *HPP* technology is an effective way to extend the shelf life of beverages, improve their microbiological profile and preserve valuable nutrients, making this method attractive to manufacturers seeking to offer quality and healthy products to their potential customers.

Keywords: high hydrostatic pressure, *HPP*, shelf life, pasteurization, drinks, microbiology, quality, vitamins.

Для цитирования: Багмут Ю.Н. Применение технологии высокого гидростатического давления для продления сроков годности напитков / Ю.Н. Багмут, Л.А. Кокорева, Н.В. Заворохина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 133-138. – EDN: MFFCAK.

Введение. Современный потребитель предъявляет высокие требования к качеству пищевых продуктов, отдавая предпочтение натуральным, полезным и минимально обработанным продуктам. Традиционная тепловая пастеризация и стерилизация, обеспечивая микробиологическую безопасность, зачастую негативно влияет на органолептические свойства, цвет и содержание термолabileльных витаминов и антиоксидантов в напитках [1]. В этой связи все более актуальными становятся нетепловые технологии, среди которых перспективным направлением является обработка высоким гидростатическим давлением (*HPP* – *High Pressure Processing*) [2-4].

Физические методы обработки в сравнении с традиционными технологиями имеют ряд преимуществ, таких как более короткое время воздействия, лучшая скорость массопереноса, лучшая функциональность продукта, более длительный срок хранения продукта и т.д., что в целом приводит к улучшению сохранности продукта [5-11].

С помощью *HPP* можно консервировать различные продукты с высоким содержанием влаги, в том числе твёрдые, жидкие или полужидкие продукты. Как правило, для эффективной инактивации микроорганизмов рекомендуется поддерживать влажность на уровне не менее 40%.

Для применения технологии *HPP* и сохранения качества подходят:

– продукты с низким или средним содержанием влаги, полутвердые или твердые продукты, упакованные в вакууме (колбасы, вяленое мясо, готовые мясные продукты, сыры, морепродукты, маринованные продукты, готовые к употреблению продукты, соусы, заправки) [12-14];

– твёрдые продукты с высоким содержанием влаги в пластиковых стаканчиках или пакетах (фруктовые джемы, мармелад, компоты, пюре);

– жидкие продукты с высоким содержанием влаги в пластиковых бутылках (молочные продукты, фруктовые и овощные соки, биологически активные напитки) [15, 16].

HPP – это новая технология с огромным

потенциалом в обеспечении стабильности фруктовых соков и напитков. Данная технология высокоэффективна для уничтожения патогенных микроорганизмов во фруктовых соках [17]. В исследованиях Petrus R., Churey J. & Worobo R. установлено, что *HPP* в значительной степени приводит к уменьшению количества патогенных микроорганизмов более чем на 5 логарифмических единиц, а именно *E. coli* 0157:H7, *S. enterica* и *L. monocytogenes*, в виноградном соке при умеренном давлении 400 МПа [18].

Методология. Цель работы – научное обоснование применения технологии *HPP* для эффективного продления сроков годности различных напитков при сохранении их высоких потребительских свойств.

Для анализа эффективности *HPP* использовались следующие контрольные показатели: общая микробная обсемененность (КОЕ/см³), активность ключевых ферментов (пероксидазы, полифенолоксидазы), содержание витамина C и антиоксидантная активность (по *DPPH*-методу). Органолептическая оценка включала профиль вкуса, аромата (запах), внешнего вида и цвета.

Обработку высоким гидростатическим давлением проводили на базе лаборатории прочности института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук [19]. Предложенная методика состоит из нескольких этапов: герметичная упаковка продукта, загрузка в гидростатическую установку, заполнение камеры водой, создание давления до 400 МПа, выдержка в течение 3 минут и последующий сброс давления.

Объектом исследования служил высокобелковый напиток на основе концентрата сывороточного белка и фруктовых пюре, яблочного и маракуя. Опытный образец обрабатывался по описанной методике, в то время как контрольный образец не подвергался воздействию давления. Оба образца в герметичной полимерной упаковке хранились при 6±2°C. Органолептическую оценку проводили после 2, 10 и 30 суток хранения.

Экспериментальная часть работы по применению высокого давления (*HPP*) была выполнена в рамках

государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

Принцип технологии *HPP* основан на передаче давления (обычно в диапазоне 100-800 МПа) через гидравлическую жидкость (чаще всего воду) на упакованный продукт, находящийся в специальной камере (рис. 1).

Микробиологические испытания: количество

мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) – по ГОСТ 10444.15-94, количество дрожжей и плесневых грибов – по ГОСТ 10444.12-2013.

Активность ферментов определяли по ГОСТ 34430-2018, антиоксидантную активность – по ГОСТ Р 54037-2010, содержание витамина С – по ГОСТ 34151-2017.

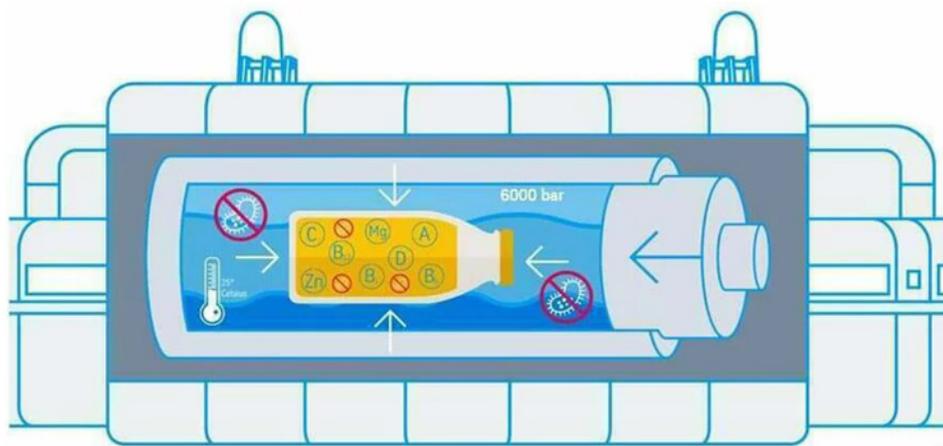


Рисунок 1 – Упрощенная схема установки для обработки продуктов высоким давлением [20]

Результаты. С целью обеспечения длительного хранения высокобелковых напитков без использования консервантов проведены исследования по обработке разлитых в потребительскую тару напитков высоким давлением. Обработка давлением 300-350 МПа показала высокую эффективность против вегетативных форм микроорганизмов (табл. 1). Дальнейшее повышение давления приводит к частичной денатурации белка.

Определено, что все исследуемые образцы соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011.

Результаты органолептической оценки конт-

рольного и опытных образцов белковых напитков представлены на рисунке 2.

Исследования показали значительное увеличение сроков годности *HPP*-обработанных образцов (табл. 2).

Данные таблицы 2 показывают основные преимущества обработки высоким давлением (*HPP*) по сравнению с отсутствием обработки и традиционной пастеризацией для белковых напитков.

Результаты сравнения влияния технологии *HPP* и тепловой пастеризации на качество белкового напитка представлены в таблице 3.

Таблица 1 – Микробиологические показатели свежеприготовленных белковых напитков и напитков, обработанных *HPP*-обработкой*

Образец	Режим обработки	КМАФАнМ, КОЕ/см ³	Дрожжи/плесени, КОЕ/см ³
Требования ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции»	–	5×10 ⁴	10
Без обработки (контроль)	–	2,5×10 ³	5
Белковый напиток 1	300 МПа, 3 мин	5,0×10 ²	Не обнаружены
Белковый напиток 2	350 МПа, 3 мин	3,2×10 ¹	Не обнаружены

* составлено авторами

Таблица 2 – Сроки годности белковых напитков при различных методах обработки*

Метод обработки	Срок годности, сутки (4±2°C)	Органолептическая оценка, баллы	Растворимость белка, %
Без обработки (контроль)	3	4,8±0,2	94,2±1,5
Пастеризация (75°C, 15 с)	15	3,9±0,2	78,5±2,1
<i>HPP</i> 300 МПа, 3 мин	20	4,5±0,2	92,8±1,2
<i>HPP</i> 350 МПа, 3 мин	30	4,3±0,1	91,5±1,8

* составлено автором

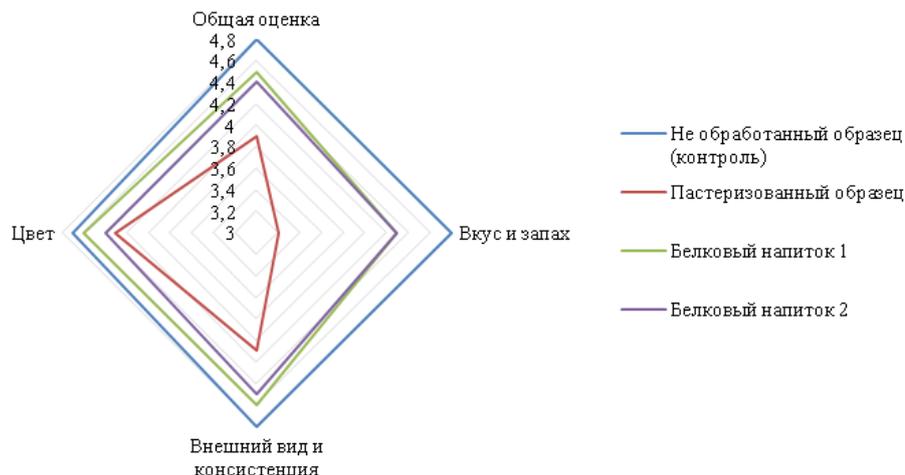


Рисунок 2 – Результаты органолептической оценки контрольного и опытных образцов белковых напитков (составлено авторами)

Таблица 3 – Сравнительное влияние HPP и тепловой пастеризации на показатели качество белкового напитка*

Параметр	Свежеприготовленный напиток	После HPP-обработки (300 МПа, 3 мин, 20°C)	После тепловой пастеризации (85°C, 2 мин)
Снижение КОЕ, %	-	80	98,7
Содержание витамина С, %	100	95-98	70-80
Антиоксидантная активность, %	100	95-98	75-85
Активность ферментов (РРО)**, %	100	5-15	< 5
Изменение цвета	Незначительное	Незначительное	Потемнение
Появление «привкуса пастеризации»	Нет	Нет	Да

* составлено авторами

** РРО – Полифенолоксидаза, фермент, ответственный за потемнение

Обсуждение. Полученные результаты показали, что высокое давление вызывает необратимые повреждения клеточной мембраны, инактивирует ключевые ферменты и рибосомы, нарушает процессы репликации ДНК. Давление так же приводит к изменению третичной и четвертичной структуры белковой молекулы, вызывая ее денатурацию и потерю каталитической активности. Обработка 300 МПа снижает количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов в 5 раз (с 2.5×10^3 до 5.0×10^2 КОЕ/см³).

Доказано, что увеличение давления напрямую повышает эффективность уничтожения вегетативных форм микроорганизмов так как обработка 350 МПа приводит к снижению показателя до значения 3.2×10^1 КОЕ/см³.

Обработка высоким давлением в диапазоне 300-350 МПа оказывает комплексное влияние на органолептические свойства белковых напитков, что обусловлено ее воздействием как на белки, так и на другие компоненты системы. В отличие от пастеризации, HPP не вызывает реакции Майяра и карамелизации, поэтому не образуется «привкус пастеризации», «вареный» или «горьковатый» оттенки. Вкус остается максимально близким к нативному (свежему) продукту. Инактивация ферментов (например, липоксигеназы) и подавление активности окислительных процессов предотвращает появление прогорклых и картонных прив-

кусов, которые могут возникать при длительном хранении [6].

Поскольку HPP не затрагивает ковалентные связи и не вызывает реакцию Майяра, цвет напитка не темнеет, как это происходит при термообработке. Обработка стабилизирует цвет продукта на протяжении всего срока годности, предотвращая неферментативное потемнение.

Выявлено, что обработка высоким давлением позволяет в 6-10 раз увеличить срок годности продукта по сравнению с образцом без обработки (контроль). Повышение давления до 350 МПа позволяет достичь максимального срока годности в 30 суток.

HPP-обработанные образцы сохраняли высокие органолептические показатели (4,5 и 4,3 балла), практически не уступая необработанному продукту (4,8 балла). В то же время пастеризация негативно сказывается на вкусе и аромате, что приводит к значительному снижению оценки до 3,9 балла. Это связано с возникновением «привкуса пастеризации» и термической деградацией компонентов.

HPP-обработка минимально влияет на растворимость белка: показатели сохраняются на уровне 91,5-92,8%, что близко к значению для необработанного образца (94,2%).

Пастеризация вызывает значительную денатурацию белка, приводя к резкому падению растворимости до 78,5%.

Как видно из таблицы 3, обработка HPP не

уступает тепловой обработке по микробиологической эффективности, но существенно превосходит ее по сохранности питательных и органолептических свойств продукта. Эффективность обработки и, как следствие, продолжительность срока годности напрямую зависят от трех основных параметров: величины давления, выдержки и температуры.

На основании проведенных исследований и анализа научной литературы [21-23] давление 300-600 МПа со временем выдержки 3-5 минут и температурой 20-25°C можно считать оптимальным режимом для большинства напитков (табл. 4). Это позволяет увеличить срок годности до 30 дней в условиях холодного хранения.

Таблица 4 – Рекомендуемые режимы HPP и сроки годности для различных типов напитков*

Тип напитка	Рекомендуемый режим HPP	Прогнозируемый срок годности (при 4±2°C)
Прозрачные соки (яблочный, апельсиновый)	400-500 МПа, 3 мин	45-60 суток
Соки с мякотью, смузи	550-600 МПа, 3-5 мин	30-45 суток
Овощные соки (томатный, морковный)	500-600 МПа, 5 мин	30-40 суток
Функциональные напитки (с добавлением пробиотиков)	300-400 МПа**, 2 мин	20-30 суток
Белковые напитки	400-600 МПа, 3 мин	20-30 суток
Холодный чай	450-550 МПа, 3 мин	50-70 суток

* составлено авторами

** для напитков с пробиотиками используются щадящие режимы, позволяющие инактивировать патогенную и технически вредную микрофлору, но сохранить жизнеспособность полезных пробиотических культур.

Выводы. Технология HPP позволяет эффективно увеличить срок хранения протеиновых напитков до 30 дней при сохранении высоких органолептических показателей. Обработка давлением 300-350 МПа в течение 3 минут снижает микробиологическую обсемененность без существенной денатурации белка.

Обработка HPP сохраняет функциональные и технологические свойства белковых напитков, в частности, растворимость белка на уровне 91-93%, что на 13-15% выше, чем при термической пастеризации.

Предлагаемая технология перспективна для производства высококачественных белковых напитков с увеличенным сроком хранения и максимальной сохранностью питательных веществ.

Таким образом, технология высокого гидростатического давления является высокоэффективным инструментом для продления срока годности широкого ассортимента напитков. К ее ключевым преимуществам относятся:

1. Максимальное сохранение натурального вкуса, аромата, цвета и, самое главное, биологически активных соединений (витаминов и антиоксидантов).
2. Обеспечение микробиологической безопасности, сравнимой с термической пастеризацией.
3. «Чистая» этикетка – позволяет производить продукты с минимальной обработкой, соответствующие современным тенденциям в области здорового питания.

Основным ограничением технологии остается высокая капиталоемкость оборудования, однако, с ростом его распространения и оптимизацией процессов, технология HPP станет стандартом для производства премиальных и функциональных напитков с увеличенным сроком хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Заворохина, Н.В. Чайные напитки антиоксидантной направленности на основе кипрея узколистного / Н.В. Заворохина, О.В. Чугунова, В.В. Фозилова // Пиво и напитки.

– 2013. – № 1. – С. 28-31. – EDN PVTVSZ.

2. Посокина, Н.Е. Современные нетермические способы обработки растительного сырья, применяемые для увеличения его хранимоспособности / Н.Е. Посокина, А.И. Захарова // Пищевые системы. – 2023. – Т. 6, № 1. – С. 4-10. – DOI 10.21323/2618-9771-2023-6-1-4-10. – EDN URBRDT.

3. Бурак, Л.Ч. Ограничения и возможности современных технологий обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов / Л.Ч. Бурак // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2024. – № 2-3(396). – С. 6-13. – DOI 10.26297/0579-3009.2024.2-3.1. – EDN JSFXRG.

4. Marangoni Junior, L., Cristianini, M., Padula, M., Anjos, C.A.R. (2019). Effect of high-pressure processing on characteristics of flexible packaging for foods and beverages. Food Research International, 119, 920-930.

5. Effects of High Pressure on the Textural and Sensory Properties of Minced Fish Meat Gels for the Dysphagia Diet" written by Keiko Yoshioka, Ai Yamamoto, Yasuyuki Matsushima, Kenji Hachisuka, Yoshihide Ikeuchi, published by Food and Nutrition Sciences, Vol.7 No.9, 2016. DOI: 10.4236/fns.2016.79074.

6. Chacha J.S., Zhang L., Ofoedu C.E. Revisiting non-thermal food processing and preservation methods – action mechanisms, pros and cons: A technological update (2016–2021). Foods. 2021. Vol. 10. P. 1430.

7. Разработка технологии охлажденной кулинарной продукции с пролонгированными сроками хранения / Ю.Н. Багмут, О.В. Чугунова, Л.А. Кокорева [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2024. – Т. 86, № 3(101). – С. 158-165. – DOI 10.20914/2310-1202-2024-3-158-165. – EDN KVRURW.

8. Production Technology Development of Semi-Finished Products from Sprouted Wheat Grain and Its Practical Application in the Smoothie Composition / A.V. Kryukov, A.V. Arisov, A.V. Vyatkin [et al.] // Food Industry. – 2024. – Vol. 9, No. 3. – P. 33-42. – DOI 10.29141/2500-1922-2024-9-3-4. – EDN GRIMOQ.

9. Mahadevan, S., Karwe M.V. (2016). Effect of high-pressure processing on bioactive compounds. Food Engineering Series, 479-507.

10. Jadhav, H.B., Annapure, U.S., Deshmukh, R.R. (2021). Non-thermal technologies for food processing. Frontiers in Nutrition, 8, Article 657090.

11. Бурак, Л.Ч. Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав / Л.Ч. Бурак // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2021. – № 3. – С. 59-73. – DOI 10.24412/2311-6447-2021-3-59-73. – EDN WQKTRW.

12. Pinggen, S., Sudhaus, N., Becker, A., Krischek, C., Klein, G. (2016). High pressure as an alternative processing step for ham production. Meat Science, 118, 22-27.

13. Liu, H., Xu, Y., Zu, S., Wu, X., Shi, A., Zhang, J. et al.

(2021). Effects of high hydrostatic pressure on the conformational structure and gel properties of myofibrillar protein and meat quality: A review. *Foods*, 10(8), Article 1872.

14. Tsevdou, M., Eleftheriou, E., Taoukis, P. (2013) Transglutaminase treatment of thermally and high pressure processed milk: Effects on the properties and storage stability of set yogurt. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 144-152.

15. Lee, P.Y., Kebede, B.T., Lusk, K., Miroso, M., Oey, I. (2017). Investigating consumers' perception of apple juice as affected by novel and conventional processing technologies. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 2564-2571.

16. Бурак, Л.Ч. Нетермические методы консервирования фруктовых соков / Л.Ч. Бурак // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2022. – № 9. – С. 75-85. – DOI 10.17513/mjpf.13444. – EDN KPAWZU.

17. Бурак Л.Ч. Современные методы консервирования, применяемые в пищевой промышленности // *The Scientific Heritage*. – 2022. – № 89 (89). – С. 106-124. – DOI 10.5281/zenodo.6575888. – EDN CLHMWH.

18. Petrus R., Churey J., Worobo R. Searching for high pressure processing parameters for escherichia coli O157:H7, salmonella enterica and Listeria monocytogenes reduction in concord grape juice. *British Food Journal*. 2020. Vol. 122. P. 170-180.

19. Сайт Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук. URL: https://www.imp.uran.ru/?q=ru/laboratory_projects&lab=26.

20. Muhammad Shahbaz H. et al. (2023), *Advances in Food Applications for High Pressure Processing Technology*, SpringerBriefs in Food, Health, and Nutrition, DOI: 10.1007/978-3-031-33643-0.

21. Исследование влияния высокого гидростатического давления на функциональные свойства изолята горохового белка / О.В. Чугунова, П.С. Бикбулатов, А.Л. Соколов, Н.В. Заворохина // *Новые технологии*. – 2023. – Т. 19, № 4. – С. 183-189. – DOI 10.47370/2072-0920-2023-19-4-183-189. – EDN SDINJO.

22. Новые технологии сферы питания в целях повышения эффективности профилактики алиментарно-зависимых заболеваний / Л.А. Маюрникова, А.А. Кокшаров, Т.В. Крапива, А.А. Дриль // *Индустрия питания*. – 2024. – Т. 9, № 3. – С. 5-15. – DOI 10.29141/2500-1922-2024-9-3-1. – EDN EVXKXT.

23. Влияние высокого гидростатического давления на микробиологические показатели мясных полуфабрикатов / Л.А. Кокорева, Ю.Н. Багмут, А.Ю. Волков [и др.] // *Journal of Agriculture and Environment*. – 2023. – № 12(40). – DOI 10.23649/JAE.2023.40.31. – EDN MAEIKJ.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК: 614.8

EDN: CFPXZC

РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ И УПРАВЛЕНИЮ РИСКОМ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© Автор 2025

SPIN: 8180-9072

AuthorID: 535992

ORCID: 0000-0001-8572-4697

ResearcherID: R-1013-2017

ScopusID: 57205428646

БЫЗОВ Антон Прокопьевич, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, Санкт-Петербург, улица Политехническая, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)

Аннотация. В статье приведен анализ существующего порядка управления риском при обосновании безопасности взрывопожароопасных производственных объектов, а также логики влияния технических, технологических, организационных и иных факторов на показатели риска, которая заключается в изменении вероятности возникновения аварий при учёте указанных факторов в рамках анализа риска. Кроме того, предложены направления совершенствования методологии оценки и управления риском аварий для обоснования вынужденных отступлений от требований безопасности при проектировании и эксплуатации взрывопожароопасных производственных объектов нефтегазового комплекса. Усовершенствован подход к оценке частот реализации инициирующих событий – аварий, пожароопасных ситуаций для оборудования площадочных объектов на основе балльно-факторной корректировки частоты с учетом множества технических, технологических и организационных факторов влияния. Предложенный принцип открытой архитектуры позволяет гибко подходить к процессу дополнения существующих систем факторов, учитывать нестандартные условия эксплуатации взрывопожароопасных производственных объектов и компенсирующие мероприятия, направленные на снижение риска. Проведен анализ опыта проведения опросов, направленных на определение значимости факторов, которая определяет их вес и используется при оценке степени изменения вероятности возникновения аварий на взрывопожароопасных производственных объектах для различного оборудования.

Ключевые слова: авария, пожарный риск, управление риском, обоснование безопасности, опасные производственные объекты.

DEVELOPMENT OF APPROACHES TO RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT IN JUSTIFYING THE SAFETY OF EXPLOSION AND FIRE HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITIES

© The Author 2025

BYZOV Anton Prokop'evich, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Technosphere Safety of the Civil Engineering Institute
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29, e-mail: byzov_ap@spbstu.ru)

Abstract. The article presents an analysis of the existing risk management framework used in safety justification for explosive and fire-hazardous industrial facilities, as well as the logic behind how technical, technological, organizational, and other factors influence risk indicators – specifically through altering the probability of accidents when these factors are considered within the risk analysis. Furthermore, the paper proposes ways to improve the methodology for risk assessment and management in justifying necessary deviations from safety requirements during the design and operation of explosive and fire-hazardous facilities within the oil and gas sector. An improved approach to estimating the frequencies of initiating events – such as accidents and fire hazards – for on-site equipment is introduced, based on a scoring-factor adjustment method that accounts for multiple technical, technological, and organizational influencing factors. The proposed principle of open architecture allows flexible expansion of existing factor systems, enables consideration of non-standard operating conditions for explosive and fire-hazardous facilities, and incorporates compensatory measures aimed at risk reduction. Additionally, an analysis is conducted of experience in conducting surveys designed to determine the significance of factors, which defines their weight and is used in assessing the degree of change in accident probability for different types of equipment at explosive and fire-hazardous industrial facilities.

Keywords: accident, fire risk, risk management, safety justification, hazardous production facilities.

Для цитирования: Бызов А.П. Развитие подходов к оценке и управлению риском при обосновании безопасности взрывопожароопасных производственных объектов / А.П. Бызов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 139-146. – EDN: CFPXZC.

Введение. Любая деятельность включает в себя неотъемлемый элемент – систему управления. Управление риском аварий, в этом смысле, является частью общей системы управления, органично включенной и связанной и с техническими, и с организационными процессами [1]. Если мы говорим об авариях и пожарах, то эффективным средством снижения тяжести экономических последствий является страхование. Отдельно стоит отметить низкую востребованность добровольных страховых продуктов в области страхования рисков возникновения финансовой ответственности при авариях, пожарах и иных техногенных происшествиях. Одной из причин данного обстоятельства автору видится, в том числе, в отсутствии унифицированного инструмента оценки риска аварий и пожаров, который позволяет учитывать широкий круг технических, технологических и организационных мер, реализуемых на объекте. Аналогичная проблема возникает при обосновании безопасности опасных производственных объектов.

В соответствии с требованиями пункта 4 статьи 3 Федерального закона от 21.07.1997 N 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [2] в случае, если при проектировании, строительстве, эксплуатации, реконструкции, капитальном ремонте, консервации или ликвидации опасного производственного объекта требуется отступление от требований промышленной безопасности, установленных федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности, таких требований недостаточно и (или) они не установлены, лицом, осуществляющим подготовку проектной документации на строительство, реконструкцию опасного производственного объекта, могут быть установлены требования промышленной безопасности к его эксплуатации, капитальному ремонту, консервации и ликвидации в обосновании безопасности опасного производственного объекта.

В настоящее время на практике основные методы и методики оценки и управления риском для взрывопожароопасных производственных объектов определены в системах Ростехнадзора и МЧС России [3, 4]. Методология оценки и управления риском, положенная в основу указанных документов, идентична в разрезе логики формирования основного показателя опасности аварий и пожаров – индивидуального риска как произведения потенциального риска и вероятности пребывания людей в различных областях территории объектов. Потенциальный риск определяется как сумма произведений частот реализации сценариев и вероятностей поражения человека в различных точках территории объекта защиты. Основным способом оценки частот реализации сценариев, положенным в основу метода «дерева событий», является перемножение частоты инициирующего события на условную вероятность конечного

события.

Общепринятым подходом к оценке частоты инициирующего события – аварии является метод «дерева отказов» [4]. Так же широко применяются логико-вероятностные методы при построении схем функциональной целостности. Указанные методы основаны на теории надёжности технических систем, однако при их применении должны быть также использованы и параметры «надёжности и безотказности» персонала при выполнении ими трудовых действий. Можно рассматривать различные группы людей: операторы технологических установок, ответственные за производственный контроль, пожарную безопасность, работники подрядных организаций, эксперты и другие. Однако при оценке вероятности совершения ошибки или вероятности бездействия учёт различных влияющих факторов, таких как обученность персонала, трудовая дисциплина, культура безопасности и прочих применительно к разным группам лиц, представляется крайне затруднительным.

Целью статьи является совершенствование подхода к оценке и управлению риском для взрывопожароопасных производственных объектов, базирующегося на балльно-факторной корректировке частоты инициирующего события, с учётом широкого круга технических, технологических, организационных факторов, а также факторов внешней среды применительно к конкретной единице оборудования площадочных объектов.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Анализ логики формирования показателя индивидуального риска на основе взаимосвязи с техническими, технологическими, организационными факторами, а также факторами внешней среды.

2. Расширение существующего подхода, основанного на балльно-факторной корректировке частоты инициирующего события, применяемого для линейных частей магистральных трубопроводов [5, 6], на случай площадочных объектов защиты и дополнение его принципом открытой архитектуры, позволяющим дополнять систему факторов.

3. Анализ результатов проведенной работы по опросу специалистов в рамках формирования весов факторов.

Методология. Цель исследования – на основе проведенных исследований [7-9] по применению метода анализа иерархий [10] с построением матриц парных сравнений для вычисления весовых коэффициентов значимости факторов усовершенствовать подход к разработке методов балльно-факторной корректировки частоты реализации аварий для различного оборудования на основе принципа открытой архитектуры.

Метод анализа иерархий позволяет преобразовать мнение эксперта в числовую оценку важности факторов путем попарных сравнений факторов.

Методы балльно-факторной корректировки

частоты реализации аварий [5, 6] ранее широко применялись при оценке риска аварий и пожаров для линейной части магистральных нефтепроводов, нефтепродуктопроводов и газопроводов. В практической деятельности по оценке риска в рамках декларирования промышленной и пожарной безопасности, обоснования безопасности, разработке специальных технических условий указанные методы успешно используются для оценки частоты реализации иницирующих событий с учетом условий строительства и эксплуатации объектов.

Объектом исследования в работе является методический аппарат оценки и управления риском на взрывопожароопасных производственных объектах.

Результаты. Генеральный подход к обоснованию безопасности опасного производственного объекта заключается в выборе показателей, чувствительных к отступлению от требований в области безопасности, а также к компенсирующим мероприятиям. По своей сути данные процессы положены в основу процесса управления риском.

Необходимо дать отдельное пояснение относительно термина «управление риском». С точки зрения субъекто-объектного подхода в управлении в данной фразе слово «риск» может восприниматься как объект управления, что не совсем корректно, так как «риск» – это показатель (индикатор) состояния безопасности на объекте, таким образом можно говорить об управлении безопасностью, но не в широком смысле, а с использованием в качестве показателей эффективности управленческих действий показателей риска.

Данную позицию подтверждает ГОСТ Р 51901.1-2002 [11], в котором под управлением риском (*risk control*) понимаются действия, осуществляемые для выполнения решений в рамках менеджмента рисков. Применяемое в практике анализа риска аварий Руководство по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» вообще не оперирует термином «управление риском», рассматривает процесс анализа риска аварий, как систему мероприятий, аналогичную описанной выше.

При этом, следует отметить, что термин «управление риском» прочно закрепился в научной и организационно-управленческой среде и позволяет отразить процесс выработки мероприятий по снижению риска (повышению безопасности) путем оценки степени его снижения с учетом внедрения указанных мероприятий.

С точки зрения теории приемлемого (допустимого) риска очень важным элементом считается оценка экономической эффективности выбранной стратегии управления риском [12, 13]. В общем случае, в рамках данной теории стоит задача выбора показателя риска R , который будет использоваться как индикатор эффективности мероприятий, и

определения зависимости вида $R(P_1, P_2, \dots, P_k)$. P_1, P_2, \dots, P_k – параметры, по которым будет осуществляться снижение риска. Указанные параметр численно характеризуют объем проводимых мероприятий.

Для оценки экономической эффективности необходимо ввести зависимости вида $C_1(P_1), C_2(P_2), \dots, C_k(P_k)$, определяющие зависимость стоимости реализации соответствующих мероприятий от объема их проведения. При этом в условиях рыночной экономики любые мероприятия проводятся в условиях ограниченных ресурсов. Таким образом, задача управления риском сводится к поиску минимума риска с учетом ограниченных финансовых ресурсов S :

$$\min R(P_1, P_2, \dots, P_k) | C_1(P_1) + C_2(P_2) + \dots + C_k(P_k) < S$$

В рамках обоснования безопасности опасных производственных объектов при обосновании компенсирующих мероприятий может решаться аналогичная задача.

Проанализируем логическую взаимосвязь между указанными параметрами и показателями риска [14-18]. В настоящий момент в практике анализа риска используется широкий набор показателей риска, в Руководстве по безопасности [4] приведено описание пяти основных и 9 дополнительных показателей риска для линейных объектов, а также 8 дополнительных показателей риска для площадочных объектов. В основу оценки большинства указанных показателей положены математические модели, учитывающие комбинацию частот реализации и последствий аварий. Наиболее часто применимыми показателями риска аварий являются индивидуальный риск и частота реализации аварий, в силу доступности статистики и относительной простоты формирования критериев допустимого риска. Рассмотрим логическую взаимосвязь между параметрами и показателем индивидуального риска.

Множество технических (толщина стенок оборудования, глубина заложения, толщина антикоррозийного покрытия, коррозионная активность грунтов и др.), технологических (давление, температура, состав, расход перекачиваемой среды и др.), организационных (обучение персонала, культура безопасности, наличие и функционирование систем контроля и управления технологическим процессом, периодичность проверок и др.), а также внешних факторов (температура окружающей среды, атмосферное давление, наличие осадков) могут или представлять собой измеряемые параметры или могут быть преобразованы в некие измеряемые параметры, основанные на балльной экспертной оценке. В случае наличия правил формирования оценок и статистических данных набор параметров может быть учтен при оценке частоты иницирующего события – аварии с учетом различных сценариев для различных единиц оборудования. По каждому из перечисленных сценариев может быть оценен показатель последствий – вероятность поражения

человека в различных областях (точках) территории объекта. Сумма произведений частот реализации сценариев и вероятностей поражения человека (с учетом возможного одновременного действия нескольких поражающих факторов, а также защитных характеристик зданий и помещений) формирует показатель потенциального риска, который характеризует потенциал реализации опасности территории с точки зрения возникновения аварий. Если учесть особенности режима рабочего дня персонала, его перемещение по площадке путем моделирования распределения вероятности пребывания людей в различных

областях территории объекта может быть оценён индивидуальный риск. Помимо этапа оценки частот реализации опасных событий различные мероприятия могут быть учтены на этапе оценки вероятности поражения людей, которые меняются при изменении количества опасного вещества, участвующего в аварии и в создании поражающих факторов, изменении защитных свойств здания или сооружения, применения средств индивидуальной и коллективной защиты и других мероприятий. Графически указанная схема логики формирования показателя индивидуального риска приведена на рисунке 1.

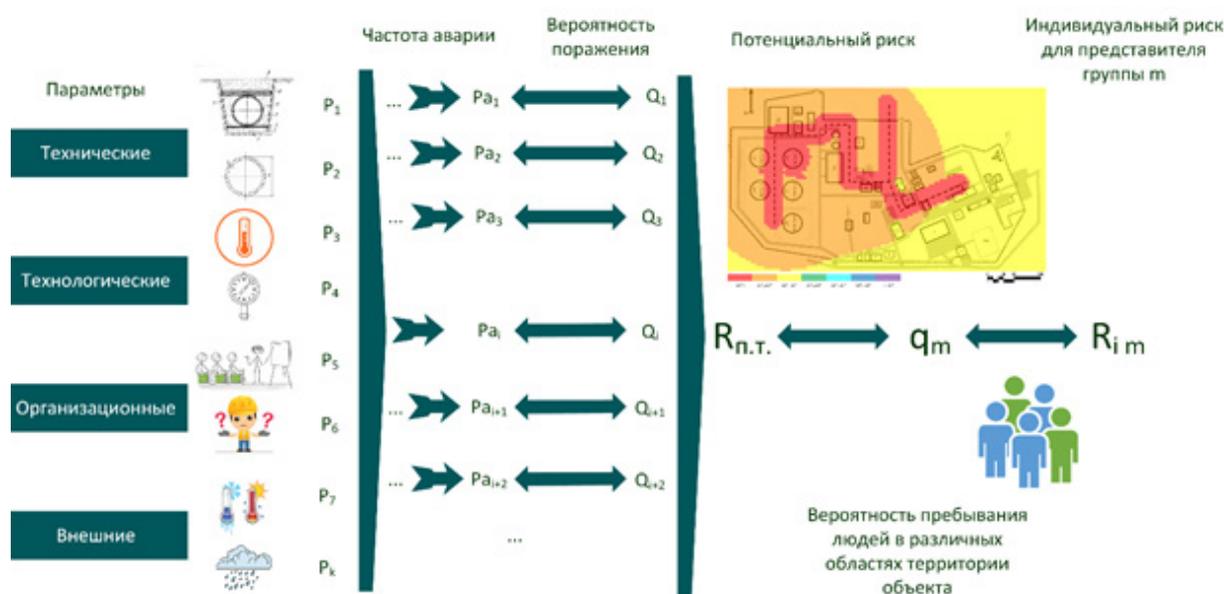


Рисунок 1 – Схема логики формирования показателя индивидуального риска

В логике данного подхода имеется возможность получать изменяемые значения риска при изменении исходных данных с учетом применения различных проектных решений или организационных мероприятий.

Конкретные факторы непосредственно связаны с оборудованием, для которого они разрабатываются. Ранее полученные результаты формирования системы факторов для емкостей со сжиженными углеводородными газами (СУГ) на автогазозаправочных станциях (АГЗС) изложены в трудах [7-9]. Система факторов для надземных емкостей с СУГ на АГЗС включает 31 фактор, объединённый в 6 групп, для подземных емкостей с СУГ на АГЗС – 25 факторов, объединённых в 4 группы.

Рассмотрим применение указанной логики по отношению к процессам обоснования безопасности взрывопожароопасных производственных объектов, а также разработки специальных технических условий, обосновывающих отступления от требований безопасности.

При обосновании безопасности существующее

законодательство рекомендует проводить анализ множества технических, технологических, измеряемых организационных мероприятий, а также показателей риска. Указанные показатели должны пройти проверку на предмет изменяемости с учетом отступления, а также с учетом применения мероприятий, компенсирующих отступление или недостаточность требования. Причем для выбранных параметров должны быть определены предельные значения. Это может быть верхняя или нижняя граница [19].

При таком подходе довольно перспективными выглядят именно показатели риска, т.к. как было продемонстрировано ранее, существует жёсткая логическая взаимосвязь между показателями риска и множеством параметров, которые могут быть взяты за основу при разработке компенсирующих мероприятий.

В практике анализа риска аварий линейной части магистральных трубопроводов нефти, газа и газового конденсата широко применяются ряд руководств по безопасности, в основу которых положен подход, основанный на корректировке среднестатисти-

ческой частоты аварий путем балльной оценки конкретного участка трубопровода с учетом весов факторов и групп факторов по формуле [5, 6, 20]:

$$P_a = P_{cp} \cdot \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_i \cdot q_{ij} \cdot B_{ij}}{B_{cp}}$$

P_{cp} – среднестатистическая частота аварии;
 B_{cp} – балльная оценка среднестатистического участка трубопровода;

B_{ij} – балльная оценка наблюдаемого на объекте фактора ij ,

p_i – весовой коэффициент i -й группы факторов;
 q_{ij} – доля (весовой коэффициент) j -го фактора в i -й группе.

Указанный подход обладает существенным преимуществом по сравнению с методом «деревьев отказов», т.к. позволяет реализовать описанную выше логику учёта множества параметров и обоснованного выбора компенсирующих мероприятий. В методиках анализа риска для линейной части магистральных трубопроводов приведены веса групп факторов и веса факторов внутри групп, нормированные на единицу. Неравномерность оценок весов позволяет учитывать важность одних факторов по отношению к другим.

Однако, практика применения данных методик при оценке риска аварий при обосновании безопасности в рамках разработки компенсирующих мероприятий показала, что не все из применяемых на практике компенсирующих мероприятий могут быть учтены при балльно-факторном анализе. Опыт проведения экспертиз промышленной безопасности показал, что не могут быть учтены следующие мероприятия по снижению риска:

- применение повышенного класса прочности стали;
- применение заводского защитного трехслойного полиэтиленового покрытия усиленного типа;
- заводское антикоррозионное покрытие;
- увеличение минимального объема контроля сварных соединений;
- применение дублирующего радиографического контроля в объеме 100% для всех сварных соединений;
- устройство геомембраны из рулонных полимерных гидроизолирующих материалов по дну и боковым откосам траншеи;
- применение для зоны сварных стыков защитного покрытия усиленного типа на основе термоусаживающих полимерных лент.

Кроме того, весовые коэффициенты групп факторов и факторов жёстко фиксированы. Теоретически в рамках оценки риска можно пересмотреть набор факторов, добавив уникальные, однако данная задача сложна с точки зрения одновременного учёта уже имеющихся весов и проведения сравнительного анализа добавляемого фактора в систему.

Вместе с тем, хотелось бы отметить, что ука-

занные недостатки не снижают качество методик, которые уже более 20 лет являются единственным работоспособным инструментом учета факторов как при оценке риска, так и разработке компенсирующих мероприятий.

Проведенные ранее исследования [7, 8] показали принципиальную возможность разработки системы балльно-факторной оценки влияния множества технических, технологических и организационно-технических мероприятий на вероятность аварии на различном типовом оборудовании на объектах нефтегазового комплекса.

В рамках данного исследования предлагается усовершенствовать подход, основанный на балльно-факторной корректировке среднестатистической частоты аварий путем применения принципа открытой архитектуры. Данный принцип заключается в формировании методов оценки частоты аварий и (или) пожароопасных ситуаций, включающих иерархическую структуру матриц попарного сравнения факторов и групп факторов.

В таблице 1 представлены результаты анкетных опросов экспертов по попарному сравнению факторов «Эксплуатационная документация» (F_{31}), «Контроль воздушной среды на наличие утечек» (F_{32}), «Квалификация персонала» (F_{33}), «Нарушение клиентами АГЗС инструкций по безопасной заправке автомобилей» (F_{34}), «Аварии и отказы, произошедшие за последние 10 лет на рассматриваемой АГЗС по причине нарушений правил эксплуатации» (F_{35}) системы факторов, приведенной в [7]. В качестве экспертов при проведении опросов были привлечены 43 специалиста: представители академического сообщества, эксплуатирующих организаций, надзорных органов, специалисты в области оценки риска.

Проведена оценка средних значений по каждому парному сравнению. При трансформации в классическую шкалу по Томасу Саати [10] учтены средние значения. Во втором столбце таблицы 1 приведено соответствие принятой условной шкалы и «классических» коэффициентов по Т. Саати. Соответственно среднее значение -3,5 соответствует 8, -2,5 – 6 и т.д.

Результаты обработки полученных результатов методом анализа иерархий Т.Саати представлены в таблице 2. Получен вектор весов принятой системы факторов на основе анкетного опроса специалистов.

В таблице 3 продемонстрирован подход, основанный на принципе открытой архитектуры. Сформированная таблица попарных сравнений факторов [7] дополнена ещё одним уникальным для рассматриваемого случая фактором F_{36} , для которого может быть осуществлено попарное сравнение с ранее определёнными факторами. В результате проведенного анализа получим скорректированный вектор приоритетов с учётом изначально установленной взаимной зависимости.

Таблица 1 – Результаты анкетных опросов парных сравнений

Балл	Коэф. по Т.Саати	F ₃₁ -F ₃₂	F ₃₁ -F ₃₃	F ₃₁ -F ₃₄	F ₃₁ -F ₃₅	F ₃₂ -F ₃₃	F ₃₂ -F ₃₄	F ₃₂ -F ₃₅	F ₃₃ -F ₃₄	F ₃₃ -F ₃₅	F ₃₄ -F ₃₅
-4	9	1	1				5	3	2	1	1
-3	7	1		2	4	4	4	5	3	1	
-2	5			9	3	10	8	6	3		
-1	3	3	6	5	6	4	3	5	5	3	6
0	1	7	13	9	7	11	8	12	18	7	13
1	1/3	2	2	5	5	4	2	5	4	2	2
2	1/5	8	11	5	10	6	7		4	8	11
3	1/7	9	5	3	3	3	4	3	2	9	5
4	1/9	12	5	5	5	1	2	4	2	12	5
Среднее		1,37	2,12	1,93	1,14	0,35	0,70	-0,16	-0,35	-0,33	-0,05
Округление среднего		1,5	2	2	1	0,5	0,5	0	-0,5	-0,5	0

Таблица 2 – Парное сравнение факторов

Фактор	F ₃₁	F ₃₂	F ₃₃	F ₃₄	F ₃₅	Произведение (Π)	Корень 5 степени из произведения ($\sqrt[5]{\Pi_i}$)	Приоритет
F ₃₁	1	0,25	0,2	0,2	0,333333	0,003333	0,320	0,054
F ₃₂	4	1	0,5	0,5	1	1	1,000	0,170
F ₃₃	5	2	1	2	2	40	2,091	0,356
F ₃₄	5	2	0,5	1	1	5	1,380	0,235
F ₃₅	3	1	0,5	1	1	1,5	1,084	0,185
Итого							$S = \sum_{i=1}^n \sqrt[5]{\Pi_i}$	1,000

Таблица 3 – Парное сравнение факторов с учетом нового введенного фактора

Фактор	F ₃₁	F ₃₂	F ₃₃	F ₃₄	F ₃₅	F ₃₆	Произведение (Π)	Корень 6 степени из произведения ($\sqrt[6]{\Pi_i}$)	Приоритет
F ₃₁	1	0,25	0,2	0,2	0,333333	1/a	Π ₁	$\sqrt[6]{\Pi_1}$	$\sqrt[6]{\Pi_1}/S$
F ₃₂	4	1	0,5	0,5	1	1/b	Π ₂	$\sqrt[6]{\Pi_2}$	$\sqrt[6]{\Pi_2}/S$
F ₃₃	5	2	1	2	2	1/c	Π ₃	$\sqrt[6]{\Pi_3}$	$\sqrt[6]{\Pi_3}/S$
F ₃₄	5	2	0,5	1	1	1/d	Π ₄	$\sqrt[6]{\Pi_4}$	$\sqrt[6]{\Pi_4}/S$
F ₃₅	3	1	0,5	1	1	1/e	Π ₅	$\sqrt[6]{\Pi_5}$	$\sqrt[6]{\Pi_5}/S$
F ₃₆	a	b	c	d	e	f	Π ₆	$\sqrt[6]{\Pi_6}$	$\sqrt[6]{\Pi_6}/S$
Итого								$S = \sum_{i=1}^n \sqrt[6]{\Pi_i}$	1,000

Обсуждение. Отдельного внимания заслуживает анализ подходов к формированию матриц парных сравнений. Возможными путями формирования данных матриц могут выступать:

1. Формирование парных сравнений единственным автором методики.
2. Формирование парных сравнений в результате обсуждения коллективом авторов [7, 8].
3. Формирование парных сравнений в результате статистической обработки результатов анкетных опросов экспертов.

Результаты сравнительного анализа приведён-

ных выше подходов представлены в таблице 4.

Для целей первичного формирования матриц парных сравнений наиболее предпочтительно использование анкетного опроса широкого круга специалистов с последующей обработкой результатов методами статистической обработки результатов. В случае необходимости дополнения системы факторов достаточно провести сессию обсуждения коллективом или учесть мнение одного специалиста-эксперта в предметной области.

Однако на данный момент не существует специализированной методики проведения анкет-

ного опроса и статистической обработки результатов опросов, позволяющих получать объективные результаты. Разработка данной методики представляется отдельным исследованием и не входит в объем данной статьи.

Практика проведения опросов коллективом Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого позволила выявить следующие проблемы и пути их решения по итогам опроса более 80 специалистов:

1. В части проведения опросов:

– у респондентов возникают сложности с пониманием предмета опроса, а именно то, что он направлен на выявление значимости факторов влияния на вероятность возникновения иницирующего события – аварии, пожароопасной ситуации. Методом проб и ошибок в рамках проведения тестовых опросов удалось сформировать понятные и простые механизмы проведения опросов на базе *yandex*-форм;

– высокий уровень занятости респондентов. При проведении опроса путём холодной массовой адресной рассылки (конкретным респондентам) приглашений к участию в опросе уровень отклика составляет не более 5%, при личном обращении к респондентам данный процент повышается до 50%, что делает процесс трудоёмким.

2. В части обработки опроса:

– отсутствие разработанной методики обработки результатов парных сравнений в рамках анкетных опросов. Проведена апробация использования в качестве истинного среднего арифметического полученных результатов парных сравнений;

– затруднения, связанные с учетом квалификации респондента для учета его веса. В рамках апробации предлагаемых подходов мнения всех экспертов, которые проходят опрос являются равнозначными. Разработка правил учёта веса эксперта представляет отдельную научную задачу и не входит в объем данной статьи.

Таблица 4 – Результаты сравнительного анализа

№	Подход	Положительные стороны	Отрицательные стороны
1	Один автор	Простота проведения и обработки результатов	Субъективизм
2	Обсуждение коллективом	Повышенная по сравнению с одним автором объективность полученных результатов	Сложность сбора в одном месте достаточного количества квалифицированных участников Сложность проведения сессий обсуждения при необходимости сравнения значительного количества факторов (5 и более)
3	Статистическая обработка опроса	Объективизация результатов Опросы могут быть растянуты во времени	Отсутствие прямой методики статистической обработки специфических результатов парных сравнений

Выводы. Результаты анкетных опросов показали наличие общих трендов в мнении респондентов, причем не всегда консолидированное мнение соответствует срединному значению – равнозначности факторов.

Усовершенствованный подход к оценке и управления риском для взрывопожароопасных производственных объектов, базирующийся на балльно-факторной корректировке частоты иницирующего события, позволяет учитывать и дополнять широкий круг технических, технологических, организационных факторов, а также факторов внешней среды в отношении различного оборудования площадочных производственных объектов защиты.

Проведенный анализ показал возможность дальнейшего совершенствования методологии оценки и управления риском аварий для обоснования вынужденных отступлений от требований безопасности при проектировании и эксплуатации взрывопожароопасных производственных объектов нефтегазового комплекса путем совершенствования механизмов учета вклада технических, технологических и организационных факторов, а также факторов внешней среды с применением усовершенствованного подхода, основанного на

балльной оценке факторов влияния, основанного на принципе открытой архитектуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Колесников Е.Ю. Проблемы риск-ориентированного подхода // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18, № 6. – С. 84-92.
- Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
- Приказ МЧС России от 26.06.2024 N 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
- Приказ Ростехнадзора от 03.11.2022 N 387 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах».
- Приказ Ростехнадзора от 01.12.2020 N 478 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах».
- Приказ Ростехнадзора от 22.12.2022 N 454 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа».
- Андреев, А.В. Методика балльно-факторной оценки частоты иницирующих пожароопасные ситуации событий для подземных емкостей автомобильной газозаправочной станции / А.В. Андреев, А.П. Бызов, П.С. Орловский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – №

4(68). – С. 131-141.

8. Бурлов, В.Г. Разработка метода балльной оценки факторов влияния на уровень пожарного риска для объектов транспортирования пожаровзрывоопасных веществ автомобильным транспортом / В.Г. Бурлов, А.П. Бызов, Я.А. Попова // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2025. – № 1(71). – С. 9-18. – EDN BKSLSN.

9. Бызов А.П. Методика балльной оценки факторов влияния на возникновение пожароопасной ситуации для надземных емкостей АГЭС / Бызов А.П., Орловский П.С. // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2024. – № 2 (33). – С. 157-167.

10. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер.с англ. Thomas L. Saaty «The Analytic Hierarchy Process». (In Russian). 1993. – 320 с.

11. ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем: М.: ГОССТАНДАРТ РОССИИ, 2002. 28 с.

12. Byzov, A.P. Social and Economic Aspects of Acceptable Risk of Ensuring Ecological Safety at Management of Municipal Waste / A.P. Byzov, S.V. Efremov, F.A. Gomazov // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference "Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development", WASTE 2018, St. Petersburg, 04–06 октября 2018 года. – St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. – P. 10-13. – DOI 10.1109/WASTE.2018.8554106.

13. Marques RO, de Vasconcelos V. Risk Management //VII Annual Scientific Initiation Seminar of the Nuclear Technology Development Center Abstract book. – С. 29.

14. Колесников Е.Ю. Способы количественной оценки и уменьшения неопределенности аварийного риска взрывопожароопасных объектов // Надежность. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 61-67.

15. CPR-18E Guidelines for quantitative risk assessment (Purple book). 2-nd ed. – Hague : VROM, 2005. – 237 p.

16. Code of practice for pipelines – Part 3: Steel pipelines on land – Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables. PD 8010-3:2009 Supplement to PD 8010-1:2004 published by the British Standards Institution.

17. CPQRA, Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, ISBN 0-8169-0402-2. The Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineers, 1988.

18. Zhang B., Liu Y., Qiao S. A quantitative individual risk assessment method in process facilities with toxic gas release hazards: a combined scenario set and CFD approach //Process safety progress. – 2019. – Т. 38. – № 1. – С. 52-60.

19. Приказ Ростехнадзора от 12.09.2023 N 331 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика установления допустимого риска аварии при обосновании безопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса».

20. Приказ Ростехнадзора от 17.02.2023 N 69 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на конденсатопроводах и продуктопроводах».

Статья поступила в редакцию 03.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 628.5

EDN: INTZPQ

**СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК YSZ ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ
ЛИТЕЙНЫХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХОВ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9362-4381

AuthorID: 1093061

ORCID: 0000-0000-0003-0305-3557

ResearcherID: GPK-8639-2022

ScopusID: 57218904012

ХРАПКО Наталья Николаевна, старший преподаватель кафедры
«Экология и производственная безопасность»*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
(190005, Россия, Санкт-Петербург ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: bgtu@voenmeh.ru)*

SPIN: 4095-7634

AuthorID: 121005

ORCID: 0000-0002-1389-7422

ScopusID: 24587952600

ПАТРУШЕВА Тамара Николаевна, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Экология и производственная безопасность»*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
(190005, Россия, Санкт-Петербург ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: bgtu@voenmeh.ru)*

SPIN: 5584-9151

AuthorID: 151052

ORCID: 0000-0001-8364-6971

МЯКИН Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Теоретических основ материаловедения»*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)
(190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, 24-26/49 литера А)*

Аннотация. На рабочих местах с источниками инфракрасного излучения, к которым относятся рабочие места в литейных и термических цехах, уровни теплового излучения часто превышают допустимые, что негативно влияет на здоровье и эффективность труда и требует специальных средств защиты от теплового излучения. В работе описан метод получения покрытий, непрозрачных в ИК-диапазоне излучения и одновременно прозрачных в видимом диапазоне. Полученные покрытия могут быть использованы для средств индивидуальной (щитки, очки и маски) и коллективной защиты (экраны). Для оптимизации синтеза покрытий, с целью получения наиболее эффективных среди них, проведено исследование зависимости оптических свойств и морфологии формируемых слоев от их толщины и температуры отжига. Установлено, что повышению эффективности защиты от теплового излучения (снижению прозрачности в ИК-диапазоне) способствует повышение температуры отжига до 700°C, приводящее к получению покрытий с наибольшей плотностью и однородностью структуры, что подтверждается максимальным ростом фрактальной размерности и снижением лакуарности.

Ключевые слова: безопасность в литейных цехах, безопасность в термических цехах, защита от ИК-излучения, оксидные покрытия, оптические свойства покрытий, ИК спектроскопия, фрактальная размерность, лакуарность, охрана труда, средства индивидуальной защиты.

**PROPERTIES OF OXIDE FILMS YSZ FOR HEAT-BARRIER SCREENS IN FOUNDRY
AND HEAT-TREATING WORKSHOPS**

© The Author(s) 2025

KHRAPKO Natalya Nikolaevna, senior lecturer of the department of «Ecology and industrial safety»*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov
(190005, Russia, Saint Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St., 1, e-mail: bgtu@voenmeh.ru)***PATRUSHEVA Tamara Nikolaevna**, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the department of «Ecology and industrial safety»*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov
(190005, Russia, Saint Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St., 1, e-mail: bgtu@voenmeh.ru)***MYAKIN Sergey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the department «Theory of Materials Science»*Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)
(190013, Russia, Saint Petersburg, Moskovsky Prospekt, 24-26/49, Building A)*

Abstract. Workplaces with sources of infrared radiation, such as those in foundries and heat treatment shops, often

exhibit thermal exposure levels that exceed permissible limits. This adversely affects workers' health and productivity, necessitating the use of specialized thermal protection equipment. This paper describes a method for fabricating coatings that absorb infrared (IR) radiation while remaining transparent in the visible spectrum. These coatings are suitable for both personal protective equipment (e.g., shields, goggles, masks) and collective protection (e.g., screens). To optimize the synthesis, the relationship between the coatings' optical properties, morphology, thickness, and annealing temperature was investigated. Annealing at 700°C yielded the most effective coatings, characterized by superior structural homogeneity, highest density, and minimal IR transparency, as evidenced by a peak in fractal dimension and a corresponding decrease in lacunarity.

Keywords: safety in foundries, safety in heat treatment workshops, IR protection, oxide coatings, optical properties of coatings, IR spectroscopy, fractal dimension, lacunarity, labour protection, personal protective equipment.

Для цитирования: Храпко Н.Н. Свойства оксидных пленок YSZ для теплозащитных экранов литейных и термических цехов/ Н.Н. Храпко, Т.Н. Патрушев, С.В. Мякин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 147-152. – EDN: IHTZPQ.

Введение. Работа в цехах промышленных предприятиях зачастую происходит в условиях воздействия повышенных уровней физических факторов окружающей среды, что негативно влияет на здоровье сотрудников и их трудоспособность. Одним из таких факторов является наличие теплового облучения на рабочем месте.

Интенсивность теплового облучения регламентируется согласно основному документу, устанавливающему допустимые уровни негативного воздействия физических факторов на рабочих местах СанПиН 1.2.3685-21 [1] и не должна превышать 140 Вт/м² от источников, нагретых свыше 600°C. Такие источники интенсивного теплового излучения встречаются на рабочих местах литейного, кузнечного, термического и других цехов.

Оборудование литейного и термического цехов включает: индукционные печи емкостью 1000 и 2000 кг; газовые печи для термической обработки изделий, в том числе крупногабаритных, максимальные температуры до 1100°C; электрические печи – отпусковые печи с максимальной температурой до 700°C; закалочные печи с максимальной температурой до 1100°C, а также закалочные баки для охлаждения изделий, как в воде, так и в масле, соляные электродные ванны для термической обработки изделий в бескислительной среде (максимальные температуры до 1300°C); дробеструйные камеры, правильный пресс для правки заготовок, высокоскоростные смесители для дозирования компонентов и смешения компонентов, стержневая машина для производства литейных стержней.

В цехах металлообработки персонал часто подвергается воздействию высоких температур вблизи источников теплового излучения. В ряде работ авторов Horton L. [2], Chawda D. [3], Воробьева К.В. [4] описано негативное воздействие на кожу и глаза человека, а также биохимические изменения в организме под воздействием инфракрасного излучения, включая снижение активности ферментов пищеварительной системы; уменьшение числа лейкоцитов и тромбоцитов в крови; снижение электрической активности кожи и изменение электродвижущей силы; поляризация кожи человека.

Для обеспечения безопасности на рабочих местах с повышенным тепловым воздействием применяется комплексный подход, который включает несколько стратегий описанных в работах Булыгина Ю.И. [5], Самары А.Б. [6] и Маслеевой О. [7]. К ним относятся: удаление персонала от источника тепла за счет механизации и дистанционного управления; регламентация времени работы в опасной зоне; использование систем приточной вентиляции и кондиционирования воздуха; а также экранирование, которое может быть применено к самому источнику тепла, рабочему месту или персоналу посредством средств индивидуальной защиты. В работе Morris N.B. [8] отмечено, что наиболее эффективной защитой от горячих поверхностей и раскаленных материалов являются теплозащитные экраны, которые используются для локализации источников лучистого тепла на рабочем месте. При этом зачастую требуются прозрачные теплозащитные экраны, чтобы обеспечить визуальный доступ к производственным процессам. В зависимости от конструкции и принципа действия, теплозащитные экраны можно разделить на следующие основные типы:

Отражающие экраны: изготавливаются из материалов с низкой излучательной способностью (например, полированный алюминий, оцинкованная сталь), они отражают энергию теплового излучения обратно к источнику.

Поглощающие экраны: выполняются из массивных теплоемких материалов (кирпич, бетон, асбестоцементные листы), которые поглощают и медленно рассеивают тепловую энергию. Комбинированные экраны: совмещают оба принципа, например, представляют собой сэндвич-конструкцию с теплоизолирующим сердечником и металлическим отражающим листом.

Прозрачные экраны: для визуального контроля используются специальные стекла с добавками или металлические сетки, которые обеспечивают частичный обзор, эффективно рассеивая и ослабляя поток теплового излучения.

В качестве теплозащитного экрана может быть использован стеклопакет, содержащий внутренний воздушный или газовый слой, который является

плохим проводником тепла, эффективность подобной конструкции исследована в работе Kaushik N. [9]. Стекло представляет собой смесь высококачественного кварцевого песка с добавлением других материалов, таких как известняк, доломит, кальцинированная сода. Отражающее стекло имеет на поверхности очень тонкий слой металла или оксида металла и уменьшает передачу теплового излучения. Такие стеклопакеты называют изоляционными и низкоэмиссионными.

В качестве перспективных теплозащитных покрытий на поверхности стекла в настоящее время авторами Wu Y. [10], Pakseresht A. [11], Liu L. [12] рассматриваются жаростойкие покрытия из оксидов редкоземельных металлов (Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , CeO_2), которые имеют высокую термостойкость и могут использоваться при высоких температурах, достигающих 1100-1700°C. Наиболее интересен диоксид циркония (ZrO_2) – материал с низкой теплопроводностью, относительно высокой прочностью, износостойкостью, вязкостью разрушения, хорошим коэффициентом термического расширения, описанный в работах Zhang X. [13] и Dai M. [14]. Для улучшения его характеристик ZrO_2 частично стабилизируют посредством легирования различными оксидами, такими как Al_2O_3 , Y_2O_3 , CeO_2 , CaO или MgO , что было отмечено в ряде работ, среди которых Zhou Y. [15] и Yin J. [16].

Для защиты от ИК-излучения требуется разработка воспроизводимых и экономичных методов получения покрытий на больших поверхностях или поверхностях сложных форм. Для решения данной задачи нами разработан экстракционно-пиролитический метод нанесения тонких оксидных пленок.

Методология. Цель данной работы заключается в исследовании оптических свойств оксидных пленок $Zr-Y-O$, полученных экстракционно-пиролитическим методом, для оптимизации условия синтеза, обеспечивающих наименьшую прозрачность в ИК-диапазоне и, соответственно, максимальную эффективность защиты от теплового излучения.

Метод изготовления исследуемых защитных покрытий заключается в получении экстрактов металлов с последующим смешением их в растворе для достижения однородности прекурсора. Предварительно проводится уточнение заданной концентрации металла в экстрактах для обеспечения точной стехиометрии продукта. После нанесения рабочего раствора на стеклянную подложку проводится пиролиз (разложение органической фазы) с образованием оксидной пленки на поверхности. Процесс нанесения и пиролиза осуществляется до достижения необходимой толщины пленки. Более подробное описание экстракционно-пиролитического метода приведено в более ранних работах авторов [17-19].

Полученные при различных температурах отжига (500°C, 600°C, 700°C) образцы кварцевого стекла с покрытием $Zr_{0,97}Y_{0,03}O_2$ (YSZ) разной тол-

щины (150 нм, 300 нм, 450 нм) были исследованы методом ИК-спектроскопии с использованием ИК-спектрофотометра *Thermo Nicolet Avatar 3600*. Поскольку кварцевое стекло характеризуется высоким пропусканием в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, нанесение рассматриваемых покрытий обеспечивает снижение прозрачности.

Микроструктуру покрытий YSZ толщиной 150 нм, полученных при различных температурах отжига (500°C, 600°C и 700°C), исследовали на атомно-силовом микроскопе «Veeco scanning probe multimode microscope». На основе полученных результатов с помощью программного обеспечения *ImageJ* и плагина *FracLac* [20] рассчитывали фрактальную размерность и лакуарность, характеризующие текстуру и однородность морфологии полученных материалов.

Результаты. Исследование микроструктуры покрытий. Оптические свойства пленок на основе диоксида циркония зависят от микроструктуры и размера зерен в пленке. АСМ-изображения покрытий YSZ представлены на рисунке 1.

Полученные результаты показывают трансформацию структуры покрытия в процессе отжига. После отжига при 500°C наблюдается конусообразная форма зерен, при этом ширина зерна составляет 20-30 нм, а высота приближается к 50 нм (рис. 1А). Укрупнение зерен происходит по обычному тонкопленочному механизму – нуклеации и роста зародышей при термообработке за счет подвижности атомов вещества покрытия.

Отжиг при более высокой температуре 600°C делает структуру крупнозернистой, при этом размер зерна достигает размеров 400 нм, а для отдельных зерен до 1 мкм. Формируемые зерна представляют собой агрегаты частиц округлой формы (рис. 1Б).

После отжига при температуре 700°C покрытие имеет гладкую поверхность – малое значение шкалы высот (15 нм) на участке в 1 мкм свидетельствует о плотной однородной структуре без крупных дефектов типа трещин или пор (рис. 1В). Гладкая структура часто является желательным свойством для оптических, защитных или электронных применений. Покрытие состоит из округлых зерен, однородных по размеру и форме. Размер зерна составляет около 10 нм.

Шероховатость пленки, отожженной при 500°C, доходит до 7 нм, пленки, отожженной при 600°C – до 16 нм, а пленки, отожженной при 700°C снова снижается до 5 нм (табл. 1).

Таблица 1 – Шероховатость и морфология покрытия YSZ от влияния температуры отжига

Тотж, °C	Ra, нм	Rz, нм	Rmax, нм	Фрактальная размерность	Лакуарность
500	0,936	3,608	16,509	1,215	0,608
600	2,947	8,373	6,813	1,529	0,734
700	1,199	3,559	4,894	1,701	0,381

Были исследованы фрактальная размерность и

лакуарность, которые характеризуют сплошность и однородность покрытия. Чем выше фрактальная размерность (D), тем больше удельная площадь поверхности, также высокий показатель D может улучшить адгезию пленки к подложке. Фрактальная структура сильно рассеивает свет, что влияет на пропускание, отражение и поглощение пленки. Лакуарность (A), количественно характеризующая пространственную неоднородность системы, снижается с увеличением однородности покрытия.

Для пленки после отжига при 500°C фрактальная размерность составила 1,2, лакуарность – 0,61, при 600°C – соответственно 1,5 и 0,7, при 700°C – соот-

ветственно 1,7 и 0,4, что указывает на повышение сплошности и однородности покрытий при наиболее высоких температурах обработки и может быть обусловлено рекристаллизацией и уменьшением размера зерна с уплотнением структуры пленки.

Исследование оптических характеристик и эффективности защиты от ИК-излучения. В видимом диапазоне длин волн полученные образцы обладают высокой прозрачностью с коэффициентом пропускания 90-96%.

ИК-спектры пленок YSZ толщиной 150, 300 и 450 нм, отожженных при температурах 500°C, 600°C и 700°C, приведены на рисунке 2.

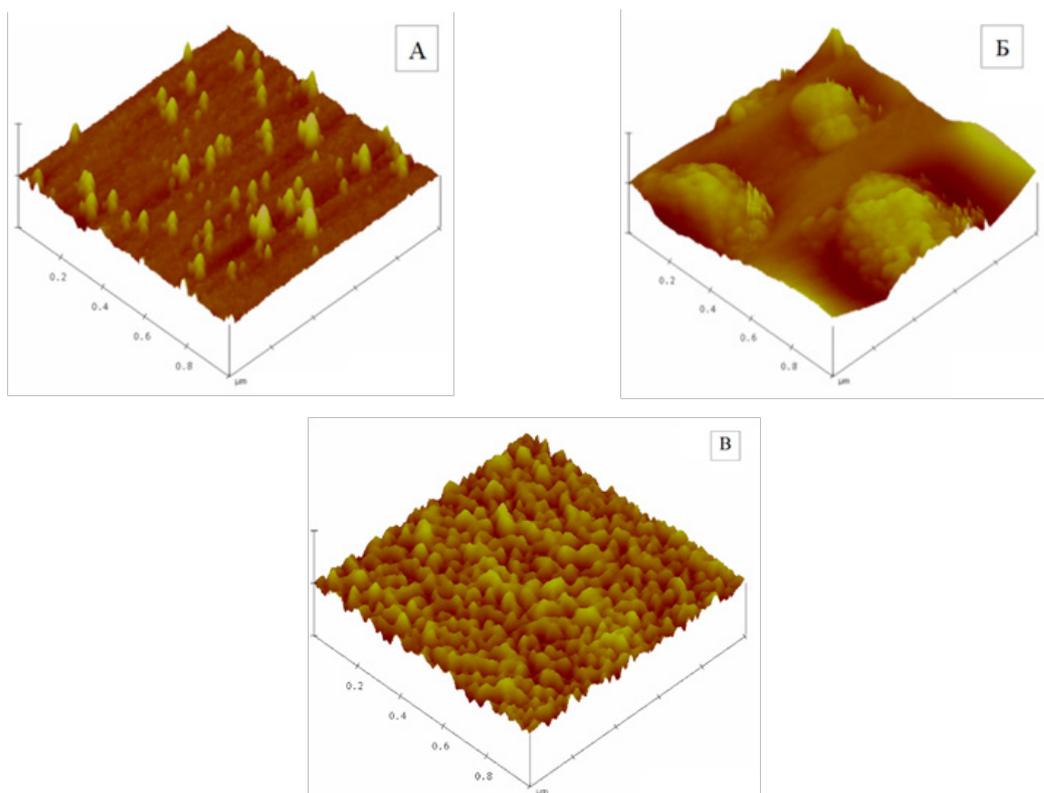


Рисунок 1 – АСМ-изображения покрытий YSZ, 150 нм, отожженных при 500°C (А), 600°C (Б), 700°C (В)

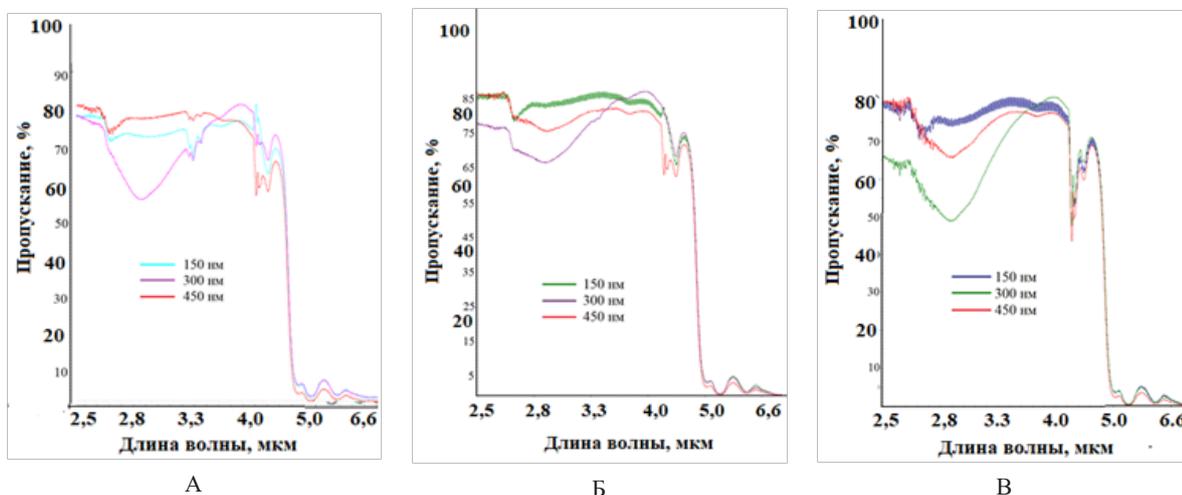


Рисунок 2 – ИК-спектры оксидных покрытий YSZ толщиной 150, 300 и 450 нм, отожжённых при 500°C (А), 600°C (Б), 700°C (В)

Пленки толщиной 300 нм наиболее эффективно снижают пропускание в ИК-диапазоне, при этом наибольшее снижение в области 2,5-3,3 мкм достигается в случае покрытий, отожжёнными при 700°C.

Обсуждение. Сравнение спектров ИК-пропускания для пленки YSZ показало, что наиболее эффективная защита наблюдается для пленки толщиной 300 нм, отожженной при 500°C и 700°C. Вероятно, высокотемпературный отжиг при 700°C способствует растеканию зерен по поверхности и снижению шероховатости поверхности покрытия. Более высокая температура отжига приводит к уплотнению пленок за счет атомной диффузии, что приводит к разрушению более крупных кристаллитов и развитию растягивающего напряжения [28]. Во время отжига атомы имеют достаточно энергии, чтобы двигаться к предпочтительным местам зародышеобразования, что способствует их определенной предпочтительной ориентации. При отжиге до 600°C эффективность защиты от ИК излучения снижается, что объясняется крупнозернистой микроструктурой покрытия с большими межзеренными зазорами и высокой лакуарностью. Зависимости пропускания от лакуарности и фрактальной размерности пленки YSZ толщиной 300 нм приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость пропускания от лакуарности и фрактальной размерности пленки YSZ толщиной 300 нм

Пропускание, %	Лакуарность	Фрактальная размерность
48	0,38	1,701
57	0,608	1,215
68	0,734	1,529

Таким образом, прозрачность оксидной пленки YSZ, полученной экстракционно-пиролитическим методом, снижается с уменьшением лакуарности, при этом наименьшая прозрачность отмечена у покрытия с наибольшей фрактальной размерностью, хотя однозначной зависимости светопропускания от данного параметра не наблюдается, что может быть связано с особенностями процессов фазообразования в тонких пленках.

Выводы. Установлено, что на оптические свойства оксидной пленки YSZ, полученной экстракционно-пиролитическим методом, влияет температура отжига, что подтверждено экспериментальными исследованиями микроструктуры покрытия и результатами спектроскопии. Наиболее эффективной для защиты от ИК-излучения является пленка YSZ толщиной 300 нм, подвергнутая отжигу при 700°C.

Дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию условий синтеза оксидных покрытий, позволят снизить их прозрачность в ИК диапазоне для создания на основе полученных материалов теплобарьерных экранов для защиты персонала

в цехах литейных, термических и других цехов с источниками повышенного ИК-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. – URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20obitaniya_compressed.pdf (дата обращения: 17.10.2025).
2. Horton L. The effects of infrared radiation on the human skin // *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*. – 2023. – Т. 39, №. 6. – С. 549-555.
3. Chawda D., Shinde P. Effects of solar radiation on the eyes // *Cureus*. – 2022. – Т. 14, №. 10. – С. e30857. – DOI: 10.7759/cureus.30857.
4. Воробьев К.В., Михайлова Н.В., Октябрьский В.П. Воздействие солнечного излучения в инфракрасной области на геном человека // IV Международная научная конференция по междисциплинарным исследованиям: сборник статей. Екатеринбург: ООО «Институт цифровой экономики и права», 2023. – С. 517-518.
5. Булыгин Ю.И., Масленский В.В., Попов Д.С. Моделирование терморadiационной картины «горячего» цеха в программном комплексе ANSYS FluidFlow (CFX) и разработка вариантов теплозащиты работников // *Инновационные технологии в науке и образовании: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ-Принт, 2019. – С. 260-265.*
6. Самара А.Б. Защита от теплового излучения на предприятиях металлургической промышленности // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2022. – Т. 2. – С. 699-702.
7. Маслеева О., Трунова И., Гейко И. Охрана труда в литейном производстве. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 192 с.
8. Morris N.B., Piil J.F., Morabito M. The HEAT-SHIELD project – Perspectives from an inter-sectoral approach to occupational heat stress // *Journal of Science and Medicine in Sport*. – 2021. – Т. 24, № 8. – С. 747-755.
9. Kaushik N., Saravanakumar P., Dhanasekhar S., Thermal analysis of a double-glazing window using a Nano-Disbanded Phase Changing Material (NDPCM) // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Т. 62. – С. 1702-1707.
10. Wu Y., He D.Y. High-temperature sintering resistance of novel NdYbZr2O7 thermal barrier coating // *Surf. Coat. Technol.* – 2023. – Т. 456. – С. 129-275.
11. Pakseresht A., Sharifianjazi F., Esmacilkhanian A. Failure mechanisms and structure tailoring of YSZ and new candidates for thermal barrier coatings: A systematic review // *Materials & Design*. – 2022. – Т. 222. – С. 111044.
12. Liu L., Wang Sh., Zhang B. Present status and prospects of nanostructured thermal barrier coatings and their performance improvement strategies. // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Т. 97. – С.12-34.
13. Zhang X., Sun Ch., Ji H. A review of CNTs and graphene reinforced YSZ nanocomposites: Preparation, mechanical and anti-irradiation properties // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2023. – Т. 167. – С. 27-49.
14. Dai M., Song X., Lin C. Investigation of microstructure changes in Al2O3-YSZ coatings and YSZ coatings and their effect on thermal cycle life // *Journal of Advanced Ceramics*. – 2022. – Т. 11, № 2. – С. 345-353.
15. Zhou Y., Nan H., Wang C. Enhanced thermal radiation blocking of YSZ-LaMgAl11O19 thermal barrier coatings consisting of splat interfaces with different refractive indexes // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2024. – Т. 44, № 15. – С. 116776.
16. Yin J., Zhang M., Zhou T. Investigating the mechanism of infrared emissivity control in MgO doped YSZ based ceramics // *Infrared Physics & Technology*. – 2024. – Т. 138. – С. 105235.
17. Khrapko N.N., Patrusheva T.N., Myakin S.V. Oxide films produced by the extraction-pyrolytic method with different transmission and absorption characteristics in the UY range // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 48-53.

18. Храпко Н.Н., Семенова В.В., Патрушева Т.Н. Работа в условиях повышенных температур и термобарьерные покрытия // Техносферная безопасность: современные научные тенденции, технические и организационные средства и методы обеспечения, специальное образование: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 20–22 мая 2024 года. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2024. – С. 113-121.

19. Храпко Н.Н., Патрушева Т.Н., Ломовцева С.Д. Защита от УФ-излучения при проведении сварочных работ. В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность, 2023. – С. 325-329.

20. Egerházi, L., Smausz T., Bari F. Inverted Fractal Analysis of TiO₂ Thin Layers Grown by Inverse Pulsed Laser Deposition // Applied Surface Science. – 2013. – Т. 278. – С. 106-110.

Статья поступила в редакцию 13.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 331.453
EDN: CKRSUR

ВЗАИМОКОНТРОЛЬ КАК ФАКТОР БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОГО ВООРУЖЕНИЯ ВЕРТОЛЕТОВ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 4991-5619
AuthorID: 1000725
ORCID: 0000-0002-0190-236X

САВЕЛЬЕВ Андрей Иванович, кандидат педагогических наук,
профессор кафедры боевого применения авиационного вооружения
*Филиала Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина в г. Сызрани»
(446007, Россия, Самарская область, Сызрань, улица Маршала Г.К. Жукова, 1,
e-mail: savandrew010871@mail.ru)*

Аннотация. Сложившиеся военно-политические реалии требуют высокого уровня готовности военной авиации к выполнению боевых задач и постоянного повышения боевого потенциала авиационных частей и подразделений. Безопасность полетов является существенным фактором, влияющим на национальную безопасность России. Опыт эксплуатации и боевого применения авиационного вооружения вертолетов доказывает необходимость строгого соблюдения требований безопасности на земле и в воздухе, что достигается эффективной совместной деятельностью авиационного персонала. В статье отражены результаты исследования проблемы безаварийной эксплуатации комплекса авиационного вооружения вертолетов как важного аспекта безопасности труда в военной авиации. Рассмотрена зависимость авиационной безопасности, как специфического вида профессионально-отраслевой безопасности, от человеческого фактора. Уточнен состав комплекса авиационного вооружения вертолетов, соответствующий выполняемым задачам в современном вооруженном противоборстве, отмечены перспективы развития авиационных средств поражения, как технических устройств повышенной опасности. На основе анализа авиационных инцидентов доказано, что основной причиной ошибок является халатность и небрежность непосредственных исполнителей. Конкретизированы основные принципы, разработаны мероприятия и методика взаимоконтроля совместной деятельности летного и инженерно-технического состава армейской авиации при эксплуатации авиационного вооружения вертолетов.

Ключевые слова: безопасность труда, авиация, авиационное вооружение, вертолет, авиационные инциденты, взаимодействие, взаимоконтроль.

MUTUAL MONITORING AS A SAFETY FACTOR IN THE EXPLOITATION OF HELICOPTER WEAPONS

© The Author(s) 2025

SAVELEV Andrey Ivanovich, candidate of pedagogical sciences,
professor of Department of combat use of aircraft weapons
*Branch of the Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy in Syzran
(446007, Russia, Samara region, Syzran, Marshal Zhukov Street, 1, e-mail: savandrew010871@mail.ru)*

Abstract. The current military and political realities require a high level of military aviation readiness to carry out combat missions and the continuous enhancement of the combat potential of aviation units and subunits. Flight safety is a significant factor influencing Russia's national security. Experience in the operation and combat employment of helicopter weapons demonstrates the need for strict compliance with safety requirements on the ground and in the air, which is achieved through effective collaboration among aviation personnel. This article presents the results of a research the problem of accident-free operation of helicopter airborne weapons systems as an important aspect of occupational safety in military aviation. The dependence of aviation safety, as a specific type of professional and industry safety, on the human factor is examined. The composition of helicopter airborne weapons systems, corresponding to the tasks performed in modern armed conflict, is clarified, and prospects for the development of airborne weapons as high-risk technical devices are highlighted. An analysis of aviation incidents demonstrates that the main cause of errors is the negligence and carelessness of those directly responsible. The key principles are specified, and measures and methods for mutual monitoring of joint activities of flight and engineering personnel of army aviation during the operation of helicopter airborne weapons are developed.

Keywords: labor safety, aviation, aircraft weapons, helicopter, aviation incidents, interaction, mutual control.

Для цитирования: Савельев А.И. Взаимоконтроль как фактор безопасности при эксплуатации авиационного вооружения вертолетов/ А.И. Савельев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 153-158. – EDN: CKRSUR.

Введение. Безопасность труда в авиации, как важнейшей универсальной транспортной и военной отрасли, является одной из наиболее приоритетных проблем. Военная авиация, как средство сдерживания и разрешения военных конфликтов, выполняет задачи обеспечения военной безопасности, сохранения территориальной целостности и национального суверенитета государства. Сегодня основной задачей армейской авиации является огневое поражение противника на всех направлениях специальной военной операции, что достигается высоким уровнем боевой готовности и воздушной выучки летного состава, максимально полным овладением боевыми возможностями современных боевых авиационных комплексов. Основным условием готовности к выполнению задач по предназначению является безаварийная эксплуатация вертолета и всех его систем. Очевидно, что авиационные средства поражения (АСП) требуют в обращении высокого профессионализма, специальных знаний и навыков, выполнения мер безопасности, которые всегда были и остаются актуальными не только при боевом применении, но и в процессе наземной эксплуатации. Умножение боевых свойств современного вооружения, качественное изменение систем управления, рост психологических перегрузок в мире высоких технологий актуализирует роль человеческого фактора, повышает требования к личностным качествам и социальной ответственности человека.

Безопасность труда является важным и неотъемлемым условием любой профессиональной деятельности, в том числе и военной службы. Деятельность вооруженных сил и в мирное время сопряжена со значительной степенью риска, состояние безопасности в войсках сказывается на жизни гражданского населения и влияет на окружающую среду. В ходе боевых действий высока вероятность ранений и гибели людей, но в повседневной деятельности потери совершенно неоправданны. Безопасность полетов, как один из видов безопасности военной службы, имеет вековой практический опыт и соответствует современным тенденциям. В ходе анализа научных публикаций, нормативно-правовых актов, учебной и специальной литературы на основе открытых источников доказан высокий интерес научного сообщества и военных специалистов к проблемам авиационной безопасности и выявлены основные направления научных изысканий.

На основе комплексного анализа ряда факторов Я.Д. Яворская обосновывает целесообразность применения различных мер и средств обеспечения авиационной безопасности, снижающих вероятность реализации негативного сценария [1]. А.В. Николаев в качестве основной характеристики современного этапа развития военной авиации принимает повышение уровня «интеллектуальности» боевого авиационного комплекса [3] и его основных систем

(бортового оборудования, авиационного вооружения и др.) [2]. Исследователи (В.Н. Бондарев, Д.С. Викторов, Е.А. Ермаков, И.М. Иванов, М.В. Шубин) приводят аргументы относительно зависимости реализации боевого потенциала авиационных комплексов и способности военной авиации выполнять задачи по предназначению от степени технической готовности и надежности авиационной техники, важности применяемых мер по снижению ее отказов в современных условиях интенсификации летной деятельности [3, 4]. В контексте изучаемой проблемы особый интерес вызывают исследования безопасности труда как психологического феномена (Н.П. Бездетнов, Г.В. Гуляева, В.В. Козлов, Т.М. Краснянская и др.). В них профессиональная надежность работника, направленная на взаимодействие с техникой и другими специалистами с целью своевременности выполнения задач без ошибок и отказов, рассматривается как значимый компонент безопасности [5-8]. Исследуя причины авиакатастроф в России и возможности их устранения, Л.А. Кайдалов считает приоритетным в безопасности полетов «человеческий фактор» и делает акцент на справедливое восприятие ошибки как неизбежного условия деятельности человека [9]. Практика подготовки пилотов в области «человеческого фактора» и «управления ресурсами экипажа» (CRM) стала важным компонентом новой философии эксплуатации высокотехнологичных воздушных судов [10]. Среди приемов и средств технологического аспекта повышения надежности деятельности экипажа доказана эффективность применения карты контрольных проверок, исключающего формальное выполнение ее пунктов; самоконтроля правильности своих действий. Существенным фактором безопасности считается взаимоконтроль действий коллег, который заключается в своевременном уведомлении друг друга о параметрах полета и выполняемых действиях с целью предотвращения случайных ошибок в работе. Таким образом, аргументирует В.В. Козлов, предметом многочисленных социально-психологических исследований становится совместная деятельность, характеризующаяся взаимосвязанностью и взаимозависимостью ее участников, в которых приоритетными направлениями являются оптимизация структуры деятельности и совершенствование взаимодействия членов летных экипажей [8, 11]. Несмотря на широкий круг научных публикаций по проблеме авиационной безопасности, в них недостаточно отражена специфика инженерно-авиационного обеспечения армейской авиации, которая заключается в более тесном, чем в других родах авиации, взаимодействии летного и инженерно-технического состава. Установлена недостаточность практико-ориентированных исследований в области подготовки специалистов по авиационному вооружению. При этом сложность и опасность

деятельности, высокий уровень ответственности за ее результаты требует изыскания и внедрения соответствующих форм и методов обеспечения профессиональной безопасности.

Методология. Исследование человеческого фактора в системе «человек-техника-производственная среда» с целью повышения безопасности труда, разработка методов определения профессиональной пригодности и компетентности работников опасных профессий, требующих повышенного внимания, быстрой реакции и высокой ответственности, являются актуальными направлениями научных исследований в рамках научной специальности 2.10.3. Безопасность труда. Целью исследования является: в теоретическом плане – теоретико-методологическое обоснование совместной деятельности авиационного персонала, в практическом плане – разработка последовательности взаимоконтроля специалистов летного и инженерно-технического состава, способствующей повышению безопасности при эксплуатации авиационного вооружения вертолетов. основополагающим требованием всех документов, регламентирующих действия летного состава, является обеспечение абсолютной безопасности собственного вертолета при применении с него средств поражения в боевых действиях и в условиях боевой подготовки мирного времени. Подчеркнем, что выполнение мер безопасности и ограничений по условиям боевого применения, грамотные и уверенные действия с системами вооружения и средствами поражения являются залогом безаварийности, помогают исключить возникновение опасных ситуаций и предпосылок к ним. Отметим особую роль инженерно-технического состава в непосредственной подготовке комплекса авиационного вооружения вертолета и выдаче полезных рекомендаций летному составу.

Результаты. Комплексом авиационного вооружения вертолета (КАВ) является совокупность находящихся на нем и функционально связанных между собой средств поражения, систем управления и прицеливания, установок ракетного, бомбардировочного и артиллерийского вооружения, обеспечивающая решение боевых задач по огневому поражению объектов противника [12]. Опыт современных военных конфликтов обосновывает применение с вертолетов [13, 14] неуправляемого ракетного вооружения (С-8, С-13) по наземным площадным целям, управляемых ракет по важным наземным объектам («Вихрь-1», ЛМУР 305Э) и воздушным целям («Игла-С»), артиллерийского вооружения (ГШ-23Л, 2А42) по беспилотным летательным аппаратам. Обозначена перспектива включения в состав КАВ нового вертолета Ми-28НМ беспилотников-«камикадзе» для поражения наземных объектов. Развитие КАВ современных вертолетов происходит под влиянием роста боевых задач, решение которых требует создания новых

средств поражения и установок вооружения с высоким уровнем интеллектуальности и адаптивности, быстроты обработки информации и применения, сохраняющих тенденции роста поражающей способности и надежности [15]. Авиационные средства поражения (АСП) относятся к категории технических устройств повышенной опасности и требуют проведения полного комплекса организационных и технических мероприятий, особой аккуратности в работе, пунктуального выполнения установленного порядка и объема подготовительных и всех операционных работ, а также строгого соблюдения общих и специальных мер безопасности. Основную работу с АСП выполняет инженерно-технический состав группы обслуживания авиационного вооружения и десантно-транспортного оборудования (АВ и ДТО) авиационной эскадрильи. Летные экипажи принимают непосредственное участие в подготовке вооружения вертолета к вылету на выполнение боевой задачи. Навыки действий по подвеске АСП, их снаряжению, работы с органами управления, знание мер безопасности позволяют летному составу грамотно, в заданное время и с высокой эффективностью осуществлять подготовку вертолета к боевому вылету и успешно решать боевые задачи в отрыве от аэродрома базирования, что характерно для тактических действий армейской авиации.

Авиационные инциденты и происшествия, связанные с эксплуатацией авиационного вооружения, негативно влияют на эффективность выполнения задач по предназначению. Проведенный анализ авиационных инцидентов последних лет в открытых источниках [16] в целях выявления причин и степени их критичности показал, что в числе основных отмечены конструктивно-производственные недостатки, некондиционные боеприпасы, нештатная работа системы управления оружием и нарушения требований безопасности (табл. 1).

Основной причиной ошибок, приводящих к инцидентам, является несобранность и недисциплинированность непосредственных исполнителей, недостаточность времени или отвлечение исполнителя в процессе выполнения им работы (операции). Проявление неэффективной совместной деятельности летного и инженерно-технического состава в авиационных событиях подчеркивает актуальность исследуемой проблемы. Одним из этапов исследования является разработка мероприятий взаимоконтроля летного и инженерно-технического состава при эксплуатации авиационного вооружения «на земле». Меры безопасности при работе с авиационным вооружением достаточно четко сформулированы, проверены десятилетиями практической деятельности, закреплены в руководящих документах [17], отражены в инструкциях и учебно-методических изданиях [18]. Они представляют собой стройную систему

организационных и технических мероприятий, обеспечивающих безопасность летного и инженерно-технического состава, которые должны выполняться в любых условиях. Разные другие причины (нехватка исполнителей, техники, инструмента и оборудования, срочность подготовки вертолета к следующему вылету и т.п.) не оправдывают «штормовщины» и нарушения последовательности выполнения контрольных операций при работе с авиационным вооружением [19].

Основой для повышения безопасности является контроль качества выполняемых работ на авиационной технике должностными лицами инженерно-авиационной службы, имеющими более высокую квалификацию, чем исполнители. Среди множества различных факторов безопасности существенным условием деятельности и движущей силой процесса взаимодействия различных специалистов является взаимоконтроль. Как диалоговая форма работы на основе взаимодоверия взаимоконтроль заключается в осуществлении контроля действий не только между членами экипажа вертолета, но и

с инженерно-техническим составом, проводящим предполетную подготовку и послеполетный осмотр вооружения. Задача взаимодействия объектов и субъектов взаимоконтроля заключается не только в информировании друг друга о выполняемом действии, но и контроль его выполнения для предотвращения случайных ошибок, связанных с воздействием «человеческого фактора». Высокий уровень автоматизации современных боевых вертолетов и их вооружения требует постоянного взаимоконтроля как неотъемлемого условия профилактики ошибок и обеспечения безопасности. К основным принципам взаимоконтроля, определяющих его характер, относятся: дисциплинированность и сознательность (постоянное осознание любого действия и последствий его выполнения); объективность и планомерность (контроль действий, предусмотренных перечнями контрольных операций); индивидуальность и компетентность (контроль каждого исполнителя специалистом, подготовленным в соответствии с объемом функциональных обязанностей).

Таблица 1 – Авиационные инциденты, связанные с эксплуатацией вооружения вертолетов

Обстоятельства	Последствия	Причины
При стрельбе на вертолете Ми-28Н из блоков Б8В20 и пушки произошло отделение пушки А242 от вертолета.	Выход из строя пушечной установки из-за неправильной установки штифтов.	Конструктивно-производственный недостаток. Нештатная работа системы управления оружием.
При выполнении предполетной подготовки вертолета Ми-28Н произошел самопроизвольный сход двух С-8КОМ.	Ракеты упали в пределах территории аэродрома, жертв и разрушений нет.	
При заходе на наземную цель вертолета Ка-52 произошел несанкционированный пуск десяти ракет С-8КОМ.	На земле ранены люди, повреждены служебные автомобили.	
Во время стрельбы из пушки ГШ-23Л на вертолете Ми-8МТШ разнотипными снарядами случился разрыв снаряда стволе	Повреждения блистера кабины, аккумуляторного отсека, лопастей винта	Некачественное проведение предполетного осмотра авиационных боеприпасов, пушек и блоков.
При выполнении пусков НАР с вертолета Ми-24П произошел разрыв ракеты С-8КОМ в канале ствола.	Повреждение лопасти несущего винта, разрушение блока Б8В20.	
При стрельбе из пушки 2А42 на вертолете Ка-52 произошел разрыв снаряда.	Повреждения обтекателя антенны, фюзеляжа вертолета.	Грубейшие нарушения мер безопасности при работе с авиационным вооружением. Ошибки персонала при эксплуатации артиллерийского оружия.
После посадки вертолета Ми-35М с остатком боекомплекта, производилась разрядка пушки ГШ-23Л с ее демонтажем в безопасное положение на земле.	Несанкционированный выстрел из пушки. Отрыв пальцев кисти левой руки авиационного техника.	
При подготовке вертолета Ми-35М к повторному вылету выявлен недострел 10 снарядов. При разрядке пушки ГШ-23Л произошел случайный выстрел.	Нанесена травма несовместимая с жизнью начальнику группы обслуживания АВ и ДТО.	
После полета экипаж вертолета Ка-52 доложил о полном израсходовании боекомплекта. Неосторожность инженера группы при осмотре на земле.	Непреднамеренный выстрел из пушки 2А42. Снаряд пробил стену строящегося здания, пострадавших нет.	
Экипаж вертолета Ми-35М после выполнения стрельбы из пушки ГШ-23Л не установил пушку в походное положение.	Повреждение (стесывание) авиационной пушки при посадке и рулении.	
При выполнении боевой задачи на вертолете Ми-35М при стрельбе из пушки ГШ-23Л по наземным целям произошел взрыв снаряда в патроннике.	Нарушение режима охлаждения стволов. Пушка выведена из строя, разрушен узел крепления лафета пушки.	

В ходе исследования конкретизированы основные мероприятия, требующие взаимоконтроля действий летного и инженерно-технического состава.

1. При подготовке авиационного вооружения к применению:

– непосредственное руководство начальником группы обслуживания АВ и ДТО или инженером части действиями всех специалистов и штатных

расчетов при подготовке вооружения [11];

– выполнение осмотра авиационных боеприпасов на предмет их качества и отсутствия некондиционных, запрещенных и просроченных АСП;

– выполнение работ по заряданию на конкретном вертолете только с разрешения бортового техника и в его присутствии после принятия предупредительных мер обеспечения безопас-

ности, контроль отсутствия впереди оружия людей и технических средств;

- строгое выполнение команд (сигналов), недопущение выполнения очередной операции без команды от старшего расчета; обязательная подача и контроль исполнения команды «от стволов» перед началом заряжания или разряжания оружия; гарантированное получение всеми специалистами команд предупреждения об опасных действиях;

- использование соответствующего маркированного инструмента и приспособлений и проверка его наличия после окончания работ; снятие предупредительных знаков после заряжания оружия и команды старшего;

- проверка борттехником надежности закрытия крышек, люков и замков, открываемых в процессе подготовки вооружения.

2. Перед вылетом проведение предполетного осмотра вертолета и его оборудования членами экипажа, а именно:

- проверка командиром экипажа целостности блоков, стволов оружия, количества и типа АСП, варианта боевой зарядки;

- контроль закрытия затворов блоков Б8В20-А, замков балочных держателей съемного оборудования и подключения штепсельных разъемов питания к изделиям систем вооружения;

- проверка в кабине целостности и положения переключателей системы управления вооружением, исправности прицельных комплексов;

- последовательное выполнение командиром экипажа и летчиком-штурманом (летчиком-оператором) карты контрольных проверок по подготовке вооружения;

- после запуска двигателей снятие борттехником предохранительных чек с систем авиационного вооружения.

3. В полете на боевое применение:

- взаимоконтроль самочувствия и состояния здоровья членов экипажа;

- доклад летчика-штурмана о готовности к выполнению боевого применения над исходным ориентиром;

- выполнение запроса руководителя полетов на полигоне о готовности к применению вооружения;

- проверка результатов применения и контроль схода АСП экипажем.

4. После посадки:

- контроль выключения летчиком-штурманом предохранительных выключателей вооружения;

- заруливание на площадку осмотра и установка в безопасном направлении;

- проверка персоналом технического поста стволов блоков и пушки, авиационных пусковых устройств;

- на стоянке выполнение визуального контроля расхода АСП экипажем;

- установка борттехником предохранительных чек в системы авиационного вооружения.

Особая роль в проведении взаимоконтроля состояния авиационного вооружения и обеспечении безопасности после посадки, при неполном расходе авиационных боеприпасов или при отказах отводится техническим постам. После полетов на боевое применение осмотру подлежат все вертолеты, при этом должны быть осмотрены все пушки (пулеметы), блоки, авиационные пусковые устройства, независимо от того, заряжались они или нет и от доклада экипажа о расходе АСП.

В результате исследования разработан порядок взаимоконтроля при эксплуатации авиационного вооружения вертолетов (рис. 1). Неукоснительное выполнение предложенных взаимных дополнений и компенсаций в совместной деятельности авиационных специалистов способно повысить ее надежность.



Рисунок 1 – Порядок взаимоконтроля при эксплуатации авиационного вооружения вертолетов

Обсуждение. Результаты исследования рассмотрены профессорско-преподавательским составом кафедры боевого применения авиационного вооружения, получена положительная оценка достоверности результатов. Представленная последовательность мероприятий взаимоконтроля, в отличие от известных, способствует надежности и безопасности совместной деятельности летного и инженерно-технического состава. Подчеркнута значимость личности человека, эксплуатирующего авиационное вооружение, которая представляет собой не только совокупность профессиональных способностей, но и морально-деловые качества, развивающиеся в ходе взаимодействия с коллегами.

Выводы. Таким образом, мероприятия безопасности военной службы, реализуемые при эксплуатации авиационного вооружения вертолетов, повышают защищенность жизни и здоровья авиационного персонала; обеспечивают целостность и эффективность работы авиационной техники; гарантируют поддержание боевой готовности и успешность выполнения задач. Взаимоконтроль авиационных специалистов различной квалификации и профиля подготовки, основанный на доверии и уверенности в правильности своих действий, является залогом успеха в безаварийной деятельности частей армейской авиации. Дальнейшего внимания требуют разработка и реализация новых идей и концепций, повышающих эффективность, рациональность и безопасность процесса эксплуатации авиационного вооружения вертолетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Яворская, Я.Д. Методы и способы обеспечения авиационной безопасности / Я.Д. Яворская. – Текст: непосредственный // Вестник магистратуры. – 2019. – № 3-1(90). – С. 12-16. – ISSN 2223-4047.
2. Николаев, А.В. Перспективы применения авиационного артиллерийского оружия на самолетах шестого поколения / А.В. Николаев. – Текст: непосредственный // Военная мысль. – 2022. – № 12. – С. 75-84.
3. Иванов, И.М. Анализ авиационных событий с государственными воздушными судами РФ из-за отказов бортового радиоэлектронного оборудования за период 2000-2017 гг. / И.М. Иванов, Д.С. Викторов, В.Н. Бондарев. – Текст: непосредственный // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технология. – 2018. – № 11(7). – С. 775-782. – DOI: 10.17516/1999-494X-0092.
4. Шубин, М.В. Проектно-ориентированное сопровождение эксплуатации авиационной техники военного назначения при заданных параметрических условиях конечного результата / М.В. Шубин, Е.А. Ермаков. – Текст: непосредственный // Российское предпринимательство. – 2018. – Том 19. № 10. – С.295-308. – ISSN 1994-6937.
5. Краснянская, Т.М. Развитие проблематики информационно-психологической безопасности в современной отечественной психологии / Т.М. Краснянская, В.Г. Тылец, В.В. Иохвидов. – Текст: непосредственный // Знание. Понимание. Умение. – 2021. – № 2. – С.192-206.
6. Гуляева, Г.В. О психологических аспектах безопасности труда / Г.В. Гуляева. – Текст: непосредственный // Научные труды Московского гуманитарного университета. – 2022. – № 4. – С. 54-61.
7. Бездетнов, Н.П. Философия летной безопасности / Н.П. Бездетнов, В.В. Алексеев. – Текст: непосредственный. – Москва: ОАО «Орехово-Зуевская типография», 2024. –

336 с.

8. Козлов, В.В. Психология безопасности совместной деятельности пилотов / В.В. Козлов. – Текст: электронный // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. – 2012. – Выпуск 4. – URL: https://vuzdoc.ru/172573/psihologiya/psihologiya_bezopasnosti_sovmestnoy_deyatelnosti_pilotov (дата обращения: 17.04.2025).
9. Кайдалов, Л.А. Причины авиакатастроф в России и возможности их устранения / Л.А. Кайдалов. – Текст: непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2024. – № 2 (51). – С. 40-46.
10. Руководство по организации контроля за обеспечением безопасности полетов / Часть А. Создание государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов и управление этой системой. – Международная организация гражданской авиации (ИКАО), 2006. – Издание 2. – 51 с. – URL: <https://dv.favt.ru> (дата обращения: 23.04.2025). – Текст: электронный.
11. Журавлев, А.Л. Совместная деятельность как объект социально-психологических исследований / Психологические основы профессиональной деятельности. Хрестоматия. – М.: ПерСэ, 2007. – С. 231-239.
12. Арбузов, И.В. Боевые авиационные комплексы и их эффективность: учебник для слушателей и курсантов инженерных вузов ВВС / И.В. Арбузов, О.В. Болховитинов, О.В. Волочаев и др. – М.: Изд. ВВИА, 2008. – С. 224.
13. Панов, В.В. Формирование рационального облика перспективных авиационных ракетных систем и комплексов / В.В. Панов, Г.И. Горчица, Ю.П. Балыко. – Текст: непосредственный. – Москва: Машиностроение, 2021. – 342 с. – ISBN: 978-5-217-03478-9.
14. Новичков, Н.Н. Российское оружие в сирийском конфликте. На мировом рынке вооружений возможны серьезные изменения / Н.Н. Новичков, Д.И. Федюшко, В.В. Костин, Л.Р. Милованова. – Текст: непосредственный. – М.: Статус, 2021. – 222 с.
15. Зотов, В.А. Земные крылья ВВС / В.А. Зотов. – Текст: непосредственный // Авиационная энциклопедия. – 2022. – № 4. – С. 18-24.
16. Ежемесячные экспресс-бюллетени по аварийности в государственной авиации Российской Федерации. – М.: МО РФ СБП авиации ВС РФ, 2015-2024. – Текст: непосредственный.
17. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации (ФАП ИАО). – 2004. – Книга первая. – Текст: непосредственный. – 251 с.
18. Гладышев, А.В. Авиационное вооружение и его боевое применение (в контексте формирования и развития военно-профессиональных качеств курсантов военных вузов): учеб. пособие / А.В. Гладышев. – Текст: непосредственный. – Сызрань: филиал ВУНЦ ВВС, 2023. – 168 с.
19. Переславцев, А.В. Подготовка стрелково-пушечного вооружения вертолета к боевому применению / А.В. Переславцев, М.М. Кубланов, С.В. Орлов. – Текст: электронный // Современные тенденции и актуальные вопросы развития стрелковых видов спорта: Материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции на базе ВГИФК. – Воронеж: Издательство «Элистр», 2018. – С. 265-269. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35335868_52427499.pdf (дата обращения: 07.08.2025).

Статья поступила в редакцию 19.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 331.45
EDN: CSPPWF

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 4073-9010
AuthorID: 888266
ORCID: 0000-0002-2316-8661
Scopus ID: 57214692444

КУЛЕШОВ Владимир Владимирович, старший преподаватель
кафедры «Промышленная экология и безопасность»
Омский государственный технический университет
(644050, Россия, Омск, пр. Мира 11, e-mail: vmvvk@mail.ru)

SPIN: 5350-3579
AuthorID: 689956
ORCID: 0000-0002-8325-1598
Scopus ID: 57204675457

БОГДАНОВ Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: bav-64@mail.ru)

Аннотация. Развитие культуры безопасности является одним из ключевых факторов повышения эффективности систем управления охраной труда и, следовательно, снижения уровня производственно обусловленной заболеваемости работников, включая травматизм. Однако существующие модели зрелости культуры безопасности носят преимущественно качественный характер и не обеспечивают количественную оценку её уровня, что затрудняет объективный мониторинг и сравнение результатов между организациями. Целью настоящего исследования стала разработка математической модели количественного определения уровня культуры безопасности на основе использования превентивных индикаторов. Применена двухуровневая система индикаторов. Первый уровень включает пять ключевых направлений, характеризующих состояние культуры безопасности (приверженность руководства, вовлечённость персонала, компетентность работников, обучение и коммуникация). Индикаторы второго уровня являются составляющими индикаторов первого уровня и позволяют получить их количественные значения с соответствующими весовыми коэффициентами. Результатом исследования стала разработанная математическая модель для количественного расчёта уровня культуры безопасности обеспечивает объективность, универсальность и возможность практического применения. Теоретическая значимость работы заключается в переходе от качественных описаний к количественной оценке уровня культуры безопасности, что позволяет объективно фиксировать изменения и сопоставлять результаты между организациями. Практическая значимость состоит в возможности применения математической модели в организациях различных отраслей для мониторинга состояния культуры безопасности, постановки целевых ориентиров и формирования программ по её совершенствованию.

Ключевые слова: культура безопасности, математическая модель, охрана труда, количественная оценка, превентивные индикаторы, уровень зрелости, система управления охраной труда.

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE LEVEL OF SAFETY CULTURE

© The Author(s) 2025

KULESHOV Vladimir Vladimirovich, senior lecturer at the Department of Industrial Ecology and Safety
Omsk State Technical University
(ave. Mira 11, Omsk, 644050, Russia, e-mail: vmvvk@mail.ru)

BOGDANOV Andrey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor of the Department of Life Safety
South Ural State University (National Research University)
(76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia, e-mail: bav-64@mail.ru)

Abstract. The development of a safety culture is one of the key factors in improving the efficiency of occupational health and safety management systems and, consequently, reducing the level of occupational morbidity, including injuries. However, existing safety culture maturity models are predominantly qualitative and do not provide a quantitative assessment of its level, which hinders objective monitoring and cross-organizational comparison of results. This study aims to develop a mathematical model for the quantitative assessment of safety culture based on leading indicators. A two-level indicator system was employed. The first tier comprises five key dimensions characterizing the state of safety culture: leadership commitment, employee engagement, workforce competence, training, and communication. The second-tier indicators serve as components of the first-tier indicators and enable the derivation of their quantitative

values, each assigned an appropriate weighting coefficient. The outcome of this research is a mathematical model for quantitatively evaluating the level of safety culture, ensuring objectivity, universality, and practical applicability. The theoretical contribution of this work lies in shifting from qualitative descriptions to a quantitative assessment of safety culture, thereby enabling objective tracking of changes and meaningful comparisons across organizations. Its practical value stems from the model's applicability across various industries to monitor safety culture, set performance targets, and design improvement programs.

Keywords: safety culture, mathematical model, occupational health and safety, quantitative assessment, leading indicators, maturity level, occupational health and safety management system.

Для цитирования: Кулешов В.В. Математическая модель для количественной оценки уровня культуры безопасности/ В.В. Кулешов, А.В. Богданов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 159-163. – EDN: CSPPWF.

Введение. В современных условиях, характеризующихся высокой степенью автоматизации, технологической оснащённостью и усложнением производственных процессов, всё более важным становится осознанное отношение работников к вопросам безопасности [1]. Следовательно, для реализации задач охраны труда недостаточно разрабатывать и внедрять технические меры. Необходимо, чтобы сотрудники разделяли ценности безопасности и проявляли готовность сообщать о рисках и участвовать в их предотвращении [2]. Поведение работников, их отношение к правилам охраны труда и правильное применение средств индивидуальной защиты существенно влияют на безопасность. В этой связи всё большую значимость приобретает культура безопасности, представляющая собой совокупность установок, ценностей и моделей поведения, разделяемых среди всех работников организации.

Исследования показывают, что культура безопасности напрямую связана с уменьшением числа инцидентов и травм на производстве [3-5]. Таким образом, инструменты и мероприятия по снижению профессиональных рисков, производственно обусловленной заболеваемости и травматизма, новые технологии и автоматизация могут показать максимальную эффективность лишь в том случае, если их реализация и внедрение сопровождается формированием позитивной культуры безопасности [6-9]. Но, чтобы повышать уровень культуры безопасности, необходимо его оценить. Это позволит внедрять эффективные и действенные мероприятия для его повышения, что окажет положительное влияние на эффективность системы управления охраной труда. Поэтому количественная оценка уровня культуры безопасности весьма актуальна.

Методология. Целью методологического этапа исследования стало обоснование подхода к построению математической модели количественной оценки уровня культуры безопасности. Для этого был проведён анализ существующих моделей зрелости культуры безопасности, которые нашли широкое применение в практике и научных исследованиях. Наиболее известными среди них являются:

– Модель Патрика Хадсона – «Лестница культуры безопасности», включающая пять уровней зрелости

и основанная на двадцатилетних исследованиях организационных психологов и социологов при поддержке компании Shell [10];

– Модель «Кривая Бредли», предложенная компанией DuPont, в которой выделяются четыре уровня развития культуры безопасности: «Реактивный», «Зависимый», «Независимый» и «Взаимозависимый» [11].

Их особенностью является наглядное представление, как культура безопасности связана с охраной труда, приверженностью руководства, вовлечённостью сотрудников, их совместным взаимодействием и взаимной поддержке. Данные методы имеют простую схему в виде этапов зрелости, отображающих основную взаимосвязь этих параметров с уровнем травматизма и эффективностью производства.

Несмотря на ценность и положительный опыт использования приведённых выше методов, следует отметить, что они носят качественный характер и не позволяют осуществлять точную количественную оценку. Отнесение организации к предложенным уровням культуры безопасности производится по ключевым признакам, а не расчётным путём. Согласно проведённому анализу, авторы, используя известные методы определения зрелости культуры безопасности, устанавливают её уровень по результатам анкетирования [12], используя опросники совместно с контрольными листами [13], на основе опросников и графического отображения [14] и т.д. В связи с этим возникает необходимость в разработке количественного метода, позволяющего более точно оценивать уровень культуры безопасности и эффективно управлять им. Для этих целей было предложено использовать превентивные (опережающие) индикаторы безопасности, позволяющие заблаговременно выявлять и устранять различные отклонения, которые могут привести к неблагоприятным событиям [15, 16].

Благодаря проведённому ранее исследованию, были определены пять ключевых направлений, оказывающих наибольшее влияние на культуру безопасности [17]. На его основе предложено использовать каждое из них в качестве самостоятельного превентивного индикатора, которые получили следующие обозначения: «Приверженность руко-

водства» (*I_{пн}*), «Вовлечённость персонала» (*I_в*), «Компетентность работников» (*I_к*), «Обучение работников» (*I_о*), «Коммуникация» (*I_{ком}*). Они были установлены, как превентивные индикаторы 1-го уровня.

Результаты. Для нахождения состояния каждого из предложенных индикаторов 1-го уровня были разработаны индикаторы 2-го уровня [18], а также найдены их весовые коэффициенты [19]. Расчёт индикаторов 1-го уровня производится по следующей формуле:

$$I_i = \sum_{j=1}^{m_i} (I_{ij} \cdot w_{ij}) \tag{1}$$

где m_i – количество индикаторов 2-го уровня, i -го индикатора 1-го уровня; I_{ij} – индикаторы 2-го уровня; w_{ij} – весовые коэффициенты индикаторов 2-го уровня.

Исходя из предложенных обозначений превентивных индикаторов [18], а также формулы (1), можно записать уравнения для нахождения каждого превентивного индикатора 1-го уровня:

$$I_{п} = I_{во} \cdot w_{во} + I_{ур} \cdot w_{ур} + I_{эл} \cdot w_{эл} + I_{м} \cdot w_{м} + I_{р} \cdot w_{р} + I_{рп} \cdot w_{рп} \tag{2}$$

$$I_{в} = I_{ен} \cdot w_{ен} + I_{ао} \cdot w_{ао} + I_{пу} \cdot w_{пу} + I_{рм} \cdot w_{рм} + I_{ск} \cdot w_{ск} \tag{3}$$

$$I_{к} = I_{спн} \cdot w_{спн} + I_{ви} \cdot w_{ви} + I_{пп} \cdot w_{пп} + I_{вд} \cdot w_{вд} \tag{4}$$

$$I_{о} = I_{эс} \cdot w_{эс} + I_{пко} \cdot w_{пко} + I_{пн} \cdot w_{пн} + I_{ро} \cdot w_{ро} + I_{пк} \cdot w_{пк} + I_{нз} \cdot w_{нз} \tag{5}$$

$$I_{ком} = I_{омп} \cdot w_{омп} + I_{оо} \cdot w_{оо} + I_{д} \cdot w_{д} + I_{рк} \cdot w_{рк} + I_{инф} \cdot w_{инф} + I_{кмд} \cdot w_{кмд} \tag{6}$$

где $I_{во}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Выполнение обязанностей»; $w_{во}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{во}$ ($w_{во} = 0,2395$); $I_{ур}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Участие руководства»; $w_{ур}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{ур}$ ($w_{ур} = 0,2135$); $I_{эл}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Эффективность проверок»; $w_{эл}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{эл}$ ($w_{эл} = 0,1008$); $I_{м}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Мотивация»; $w_{м}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{м}$ ($w_{м} = 0,1938$); $I_{р}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Результативность»; $w_{р}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{р}$ ($w_{р} = 0,1599$); $I_{рп}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Реализация предложений»; $w_{рп}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{рп}$ ($w_{рп} = 0,0925$); $I_{ен}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Участие персонала в ежедневных инструктажах»; $w_{ен}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{ен}$ ($w_{ен} = 0,1474$); $I_{ао}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Анализ опасностей»; $w_{ао}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{ао}$ ($w_{ао} = 0,2542$); $I_{пу}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Внесение предложений по улучшению»; $w_{пу}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{пу}$ ($w_{пу} = 0,2003$); $I_{рм}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Участие в разработке мероприятий»; $w_{рм}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{рм}$ ($w_{рм} = 0,1871$); $I_{ск}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Наличие стабильности кадров»; $w_{ск}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{ск}$ ($w_{ск} = 0,2111$); $I_{спн}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Следование правилам и инструкциям»; $w_{спн}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{спн}$ ($w_{спн} = 0,2844$); $I_{ви}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Восприятие информации»; $w_{ви}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{ви}$

($w_{ви} = 0,2451$); $I_{пп}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Принятие решений»; $w_{пп}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{пп}$ ($w_{пп} = 0,237$); $I_{вд}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Выполнение действий»; $w_{вд}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{вд}$ ($w_{вд} = 0,2335$); $I_{эс}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Эффективность совещаний по охране труда»; $w_{эс}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{эс}$ ($w_{эс} = 0,081$); $I_{пко}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Повышение качества обучения»; $w_{пко}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{пко}$ ($w_{пко} = 0,2634$); $I_{пн}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Проведение инструктажей»; $w_{пн}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{пн}$ ($w_{пн} = 0,1818$); $I_{ро}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Результаты обучения»; $w_{ро}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{ро}$ ($w_{ро} = 0,1995$); $I_{пк}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Повышение квалификации»; $w_{пк}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{пк}$ ($w_{пк} = 0,1652$); $I_{нз}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Недостаток знаний»; $w_{нз}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{нз}$ ($w_{нз} = 0,1091$); $I_{омп}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Отношение между персоналом»; $w_{омп}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{омп}$ ($w_{омп} = 0,213$); $I_{оо}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Оперативность оповещения»; $w_{оо}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{оо}$ ($w_{оо} = 0,163$); $I_{д}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Доверие»; $w_{д}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{д}$ ($w_{д} = 0,2221$); $I_{рк}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Разрешение конфликтов»; $w_{рк}$ – весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{рк}$ ($w_{рк} = 0,0774$); $I_{инф}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Информирование»; $w_{инф}$ – его весовой коэффициент ($w_{инф} = 0,1691$); $I_{кмд}$ – превентивный индикатор 2-го уровня «Командность»; $w_{кмд}$ –

весовой коэффициент превентивного индикатора 2-го уровня $I_{Кмд}$ ($w_{Кмд} = 0,1554$).

Согласно методике оценки, каждый из предложенных индикаторов может принимать значения от 0 до 1. Значения весовых коэффициентов превентивных индикаторов 2-го уровня в уравнениях (2-6) были определены ранее [19].

Для расчёта итогового уровня культуры безопасности УКБ, необходимо рассчитать показатель культуры безопасности КБ, который зависит от превентивных индикаторов 1-го уровня. Показатель КБ предлагается определять по выражению (7):

$$КБ = \sum_{i=1}^n (I_i \cdot w_i) \quad (7)$$

где w_i – весовые коэффициенты превентивных индикаторов 1-го уровня, n – количество превентивных индикаторов l -го уровня ($n=5$).

В развёрнутом виде выражение (7), для определения показателя культуры безопасности КБ, можно выразить с помощью формулы (8):

$$КБ = I_{\Pi} \cdot w_{\Pi} + I_{В} \cdot w_{В} + I_{К} \cdot w_{К} + I_{О} \cdot w_{О} + I_{Ком} \cdot w_{Ком} \quad (8)$$

где w_{Π} – весовой коэффициент индикатора 1-го уровня I_{Π} «Приверженность руководства» ($w_{\Pi}=0,2681$); $w_{В}$ – весовой коэффициент индикатора 1-го уровня $I_{В}$ «Вовлечённость персонала» ($w_{В}=0,21$); $w_{К}$ – весовой коэффициент индикатора 1-го уровня $I_{К}$ «Компетентность работников» ($w_{К}=0,2067$); $w_{О}$ – весовой коэффициент индикатора 1-го уровня $I_{О}$ «Обучение работников» ($w_{О}=0,2021$); $w_{Ком}$ – весовой коэффициент индикатора 1-го уровня $I_{Ком}$ «Коммуникация» ($w_{Ком}=0,1131$);

Значения весовых коэффициентов превентивных индикаторов 1-го уровня в уравнении (8) также были определены ранее [19].

С учетом выражений (2-6, 8) получим систему (9) для количественного определения показателя культуры безопасности КБ на основе применения превентивных индикаторов:

$$\begin{cases} КБ = I_{\Pi} \cdot w_{\Pi} + I_{В} \cdot w_{В} + I_{К} \cdot w_{К} + I_{О} \cdot w_{О} + I_{Ком} \cdot w_{Ком} \\ I_{\Pi} = I_{ВО} \cdot w_{ВО} + I_{УР} \cdot w_{УР} + I_{ЭП} \cdot w_{ЭП} + I_{М} \cdot w_{М} + I_{Р} \cdot w_{Р} + I_{РП} \cdot w_{РП}, \\ I_{В} = I_{ЕИ} \cdot w_{ЕИ} + I_{АО} \cdot w_{АО} + I_{ПУ} \cdot w_{ПУ} + I_{РМ} \cdot w_{РМ} + I_{СК} \cdot w_{СК}, \\ I_{К} = I_{СПИ} \cdot w_{СПИ} + I_{ВИ} \cdot w_{ВИ} + I_{ПР} \cdot w_{ПР} + I_{ВД} \cdot w_{ВД}, \\ I_{О} = I_{ЭС} \cdot w_{ЭС} + I_{ПКО} \cdot w_{ПКО} + I_{ПИ} \cdot w_{ПИ} + I_{РО} \cdot w_{РО} + I_{ПК} \cdot w_{ПК} + I_{НЗ} \cdot w_{НЗ} \\ I_{Ком} = I_{ОМП} \cdot w_{ОМП} + I_{ОО} \cdot w_{ОО} + I_{Д} \cdot w_{Д} + I_{РК} \cdot w_{РК} + I_{Инф} \cdot w_{Инф} + I_{Кмд} \cdot w_{Кмд} \end{cases} \quad (9)$$

Система (9) показывает, что показатель КБ зависит от состояния превентивных индикаторов 1-го и 2-го уровней, и их весовых коэффициентов.

На основе значения показателя культуры безопасности КБ, можно установить уровень культуры безопасности УКБ. Согласно ранее проведённому исследованию, представленному в № 3(71), т.14 журнала XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс (статья Кулешова В.В., Богданова А.В., «Разработка шкалы уровней культуры безопасности методом Дельфи», стр. 133-137), определено 5 уровней культуры безопасности УКБ: «Низкий», «Умеренный», «Средний», «Высокий», «Превосходный». Для их нахождения, в этой же работе, были установлены границы уровней культуры безопасности и получено выражение для нахождения уровня культуры безопасности УКБ:

$$УКБ = \begin{cases} УКБ_{ПУ}, \text{ если } 0,96 < КБ \leq 1; \\ УКБ_{ВУ}, \text{ если } 0,8 < КБ \leq 0,95; \\ УКБ_{СУ}, \text{ если } 0,6 < КБ \leq 0,8; \\ УКБ_{УУ}, \text{ если } 0,3 < КБ \leq 0,6; \\ УКБ_{НУ}, \text{ если } 0 \leq КБ \leq 0,3. \end{cases} \quad (10)$$

где $УКБ_{ПУ}$ – превосходный уровень культуры безопасности; $УКБ_{ВУ}$ – высокий уровень культуры безопасности; $УКБ_{СУ}$ – средний уровень культуры безопасности; $УКБ_{УУ}$ – умеренный уровень культуры безопасности; $УКБ_{НУ}$ – низкий уровень культуры безопасности.

Объединив полученные системы (9) и (10), можно представить итоговую математическую модель для определения уровня культуры безопасности (11):

$$\begin{cases} УКБ = \begin{cases} УКБ_{ПУ}, \text{ если } 0,96 < КБ \leq 1; \\ УКБ_{ВУ}, \text{ если } 0,8 < КБ \leq 0,95; \\ УКБ_{СУ}, \text{ если } 0,6 < КБ \leq 0,8; \\ УКБ_{УУ}, \text{ если } 0,3 < КБ \leq 0,6; \\ УКБ_{НУ}, \text{ если } 0 \leq КБ \leq 0,3. \end{cases} \\ \begin{cases} КБ = I_{\Pi} \cdot w_{\Pi} + I_{В} \cdot w_{В} + I_{К} \cdot w_{К} + I_{О} \cdot w_{О} + I_{Ком} \cdot w_{Ком} \\ I_{\Pi} = I_{ВО} \cdot w_{ВО} + I_{УР} \cdot w_{УР} + I_{ЭП} \cdot w_{ЭП} + I_{М} \cdot w_{М} + I_{Р} \cdot w_{Р} + I_{РП} \cdot w_{РП}, \\ I_{В} = I_{ЕИ} \cdot w_{ЕИ} + I_{АО} \cdot w_{АО} + I_{ПУ} \cdot w_{ПУ} + I_{РМ} \cdot w_{РМ} + I_{СК} \cdot w_{СК}, \\ I_{К} = I_{СПИ} \cdot w_{СПИ} + I_{ВИ} \cdot w_{ВИ} + I_{ПР} \cdot w_{ПР} + I_{ВД} \cdot w_{ВД}, \\ I_{О} = I_{ЭС} \cdot w_{ЭС} + I_{ПКО} \cdot w_{ПКО} + I_{ПИ} \cdot w_{ПИ} + I_{РО} \cdot w_{РО} + I_{ПК} \cdot w_{ПК} + I_{НЗ} \cdot w_{НЗ} \\ I_{Ком} = I_{ОМП} \cdot w_{ОМП} + I_{ОО} \cdot w_{ОО} + I_{Д} \cdot w_{Д} + I_{РК} \cdot w_{РК} + I_{Инф} \cdot w_{Инф} + I_{Кмд} \cdot w_{Кмд} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

В предложенной математической модели (11) сначала определяются показатели превентивных индикаторов 2-го уровня. Затем, с учётом их весовых коэффициентов, рассчитываются показатели превентивных индикаторов 1-го уровня. Далее, с учетом весовых коэффициентов индикаторов 1-го уровня, определяется значение показателя КБ. После по его значению – уровень культуры безопасности УКБ.

Обсуждение. Разработанная нами математическая модель имеет преимущество по сравнению с существующими методами. В отличие от ранее рассмотренных методов, которые основываются на качественном описании уровней зрелости, предложенная математическая модель (11) позволяет получить числовое выражение показателя КБ, по которому определяется уровень культуры безопасности УКБ. Это, в свою очередь, даёт возможность объективно фиксировать изменения, проводить мониторинг, а также планировать и реализовывать необходимые мероприятия для совершенствования системы управления охраной труда. Кроме того, модель является универсальной и применимой в организациях различных отраслей экономики. Таким образом, предложенный инструмент можно рассматривать как действенный метод количественной оценки и улучшения УКБ, что существенно повышает его практическую ценность для организаций.

Выводы. Проведённое исследование позволило разработать математическую модель (11) для количественной оценки УКБ, которая основана на применении превентивных индикаторов и их весовых коэффициентов. Использование данного подхода позволяет более точно определить текущее состояние культуры безопасности в организации, а также формировать приоритеты при разработке и внедрении мероприятий в области охраны труда. Так, после оценки УКБ необходимо выделить в первую очередь превентивные индикаторы 1-го, а потом 2-го уровня с наиболее низкой оценкой. Далее, на основе полученных данных, разработать и внедрить мероприятия для повышения показателей превентивных индикаторов. На следующем этапе необходимо провести повторную оценку превентивных индикаторов и определить УКБ. Это позволит реализовать рациональный подход к совершенствованию системы управления охраной труда, выявляя и улучшая в первую очередь самые «слабые» и приоритетные места в системе, а в дальнейшем улучшать и другие её элементы.

Предложенный подход может применяться в организациях с любым количеством работников, а также при любом уровне культуры безопасности. Полученные результаты вносят вклад в развитие современных подходов к управлению безопасностью на производстве, создавая основу для системного мониторинга и постоянного совершенствования культуры безопасности, что, в конечном итоге, приведет к повышению безопасности труда работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Amirah N.A., Him N.F.N., Rashid A., Rasheed R., Zaliha T.N., Afthanorhan A. Fostering a safety culture in manufacturing through safety behavior: A structural equation modelling approach // Journal of Safety and Sustainability. – 2024. – Vol. 1. – № 2. – P. 108-116.
2. Abeje M., Luo F. The Influence of Safety Culture and Climate on Safety Performance: Mediating Role of Employee Engagement in Manufacturing Enterprises in Ethiopia // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – № 14. – P. 11274.
3. Churrua K., Ellis L.A., Pomare C., Hogden A., Bierbaum M., Long J.C., Olekalns A., Braithwaite J. Dimensions of safety culture: a systematic review of quantitative, qualitative and mixed methods for assessing safety culture in hospitals // BMJ Open. – 2021. – Vol. 11. – № 7. – P. e043982.
4. Naji G.M.A., Isha A.S.N., Mohyaldinn M.E., Leka S., Saleem M.S., Rahman S.M.N.B.S.A., Alzoraiki M. Impact of Safety Culture on Safety Performance; Mediating Role of Psychosocial Hazard: An Integrated Modelling Approach // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18. – № 16. – P. 8568.
5. Naji G.M.A., Isha A.S.N., Mohyaldinn M.E., Leka S., Saleem M.S., Rahman S.M.N.B.S.A., Alzoraiki M. Impact of Safety Culture on Safety Performance; Mediating Role of Psychosocial Hazard: An Integrated Modelling Approach // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18. – № 16. – P. 8568.
6. Claxton G., Hosie P., Sharma P. Toward an effective occupational health and safety culture: A multiple stakeholder perspective // Journal of safety research. – 2022. – Vol. 82. – P. 57-67.
7. Sharkey S.B., Sharples A.Y. An approach to consensus building using the Delphi technique: developing a learning resource in mental health // Nurse Education Today. – 2001. – Vol. 21. – № 5. – P. 398-408.
8. Ниязов, А.Р. К вопросу о производственной безопасности и уровне травматизма на объектах электроэнергетики / А.Р. Ниязов // Вестник Югорского государственного университета. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 38-42. – DOI 10.18822/byusu20250138-42.
9. Усикова, О.В. Механизм выбора и внедрения проактивных методов управления охраной труда / О.В. Усикова // Экономика. Профессия. Бизнес. – 2025. – № 1. – С. 126-131. – DOI 10.14258/epb202514.
10. Zwetsloot G.I.J.M., van Middelaar J., van der Beek D. Repeated assessment of process safety culture in major hazard industries in the Rotterdam region (Netherlands) // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 257. – P. 120540.
11. Fernández R.H. La curva de Bradley en el sector minero // Energía & Minas: Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas. – 2019. – № 15. – P. 12-19.
12. Chan E. A multi-level safety culture maturity model for (new) building projects in Hong Kong // HKIE Transactions. – 2023. – Vol. 30. – № 1. – P. 95-105.
13. Joomun A.B.Z., Wallace C.A., Aumjaid B., Ramful-Baboolall D. Food safety culture and climate prevailing in micro and small food manufacturing enterprises in Mauritius and Rodrigues // International Journal of Food Science and Technology. – 2024. – Vol. 59. – № 2. – P. 685-702.
14. Siuta D., Kukfiisz B., Kuczyńska A., Mitkowski P.T. Methodology for the Determination of a Process Safety Culture Index and Safety Culture Maturity Level in Industries // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19. – № 5. – P. 2668.
15. Sheehan C., Donohue R., Shea T., Cooper B., Cieri H.D. Leading and lagging indicators of occupational health and safety: The moderating role of safety leadership // Accident Analysis & Prevention. – 2016. – Vol. 92. – P. 130-138.
16. Pawłowska Z. Using lagging and leading indicators for the evaluation of occupational safety and health performance in industry // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2015. – Vol. 21. – № 3. – P. 284-290.
17. Кулешов, В.В. Влияние превентивных индикаторов культуры безопасности на уровень профессионального риска / В.В. Кулешов, В.С. Сердюк // Безопасность жизнедеятельности. – 2021. – № 9(249). – С. 14-19.
18. Кулешов, В.В. Разработка классификации превентивных индикаторов культуры безопасности / В.В. Кулешов, В.С. Сердюк // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2022. – № 1. – С. 71-80. – DOI 10.25558/VOSTNIИ.2022.90.55.007.
19. Кулешов, В.В. Расчет весовых коэффициентов превентивных индикаторов / В.В. Кулешов, А.И. Фомин // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 4. – С. 56-60. – DOI 10.24000/0409-2961-2025-4-56-60.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 534.6

EDN: RSKWSO

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЧУГУНА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 5473-2850

AuthorID: 174116

ORCID: 0000-0002-6173-9365

ScopusID: 55880016900

МЕСХИ Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»

*Донской государственный технический университет
(344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, зд. 1.)*

ДЖЕДИРОВ Дмитрий Александрович, аспирант
*Донской государственный технический университет
(344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, зд. 1.)*

SPIN: 3720-4160

AuthorID: 140003

ORCID: 0000-0003-0644-7412

ScopusID: 57221192933

БУЛЫГИН Юрий Игоревич, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»

*Донской государственный технический университет
(344003, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, зд. 1.)*

Аннотация. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований шумообразования и вибрации при фрезеровании чугунных заготовок. Разработаны аналитические модели, описывающие генерацию звука различными источниками: режущим инструментом (фрезой) и обрабатываемой заготовкой, рассматриваемой как в виде балки на упругом основании, так и в виде консольно-закрепленного элемента. Модели учитывают геометрические и физико-механические параметры системы, условия закрепления и диссипативные свойства материалов. Теоретически рассчитаны уровни звукового давления на собственных частотах колебаний системы. Проведен эксперимент по фрезерованию заготовки из серого чугуна, результаты которого (спектры шума) показали высокую сходимость с теоретическими данными (расхождение не превышает ± 2 дБ). Установлено, что существующие станки создают уровни звукового давления, превышающие санитарные нормы на 0-12 дБА, с максимальным уровнем до 92 дБА. На основе проведенных исследований предложены направления для проектирования систем шумоподавления, включая вибродемпфирование оправок фрез и применение акустических экранов. Полученные зависимости позволяют на этапе проектирования технологических процессов прогнозировать акустическую обстановку и разрабатывать эффективные меры по ее нормализации.

Ключевые слова: фрезерование, чугун, шумообразование, вибрация, звуковое давление, математическое моделирование, собственные частоты, коэффициент потерь, санитарные нормы шума, вибродемпфирование, акустическое моделирование.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF NOISE GENERATION DURING MILLING OF CAST IRON

© The Author(s) 2025

MESKHI Besarion Chokhovich, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection,

*Don State Technical University
(344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, building 1.)*

DZHEDIROV Dmitry Aleksandrovich, post-graduate student
Don State Technical University

(344003, Rostov-on-Don, Russia, Gagarin Square, building 1.)

BULYGIN Yuri Igorevich, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Department of "Life Safety and Environmental Protection",

*Don State Technical University
(344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Square, building 1.)*

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of noise generation and vibration during milling of cast iron workpieces. Analytical models have been developed that describe the sound generation from various sources: a cutting tool (milling cutter) and a workpiece being processed, considered both as a beam on an elastic

base and as a cantilevered element. The models take into account the geometric and physico-mechanical parameters of the system, the conditions of fixation and the dissipative properties of materials. The sound pressure levels at the natural oscillation frequencies of the system are theoretically calculated. An experiment was conducted on milling a blank made of gray cast iron, the results of which (noise spectra) showed high convergence with theoretical data (the discrepancy does not exceed ± 2 dB). It has been established that existing machines create sound pressure levels 15-20 dBA higher than sanitary standards. Based on the conducted research, directions for the design of noise reduction systems are proposed, including vibration damping of milling cutter mandrels and the use of acoustic screens. The obtained dependences make it possible to predict the acoustic situation at the design stage of technological processes and develop effective measures to normalize it.

Keywords: milling, cast iron, noise generation, vibration, sound pressure, mathematical modeling, natural frequencies, loss coefficient, sanitary noise standards, vibration damping, acoustic modeling.

Для цитирования: Месхи Б.Ч. Теоретические и экспериментальные исследования шумообразования при фрезеровании чугуна / Б.Ч. Месхи, Д.А. Дзедиров, Ю.И. Булыгин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 164-169. – EDN: RSKWSO.

Введение. Шум и вибрация, сопровождающие процесс механической обработки, являются значительными негативными факторами производственной среды металлообрабатывающих цехов. Они не только снижают комфорт и производительность труда станочников, но и при длительном воздействии приводят к профессиональным заболеваниям. Особенно остро эта проблема стоит при обработке таких хрупких материалов, как чугун, и при использовании процессов с прерывистым резанием, к которым относится фрезерование. В связи с ужесточением санитарных норм и требований охраны труда, актуальной задачей является разработка научно обоснованных методов прогнозирования и снижения шума на этапе проектирования технологических процессов. Решение данной задачи невозможно без глубокого понимания физических механизмов шумообразования и построения адекватных математических моделей.

Основная гипотеза исследования состоит в том, что шумообразование при фрезеровании чугуна представляет собой детерминированный процесс, обусловленный вынужденными колебаниями системы "инструмент-заготовка", и может быть с достаточной для инженерных расчетов точностью описан совокупностью аналитических моделей, учитывающих распределенные параметры этой системы и различные условия закрепления элементов. Отдельные аспекты моделирования шумообразования в металлообработке рассмотрены в исследованиях [7, 12].

Методология. В основе работы лежит подход, при котором система «инструмент-заготовка» рассматривается как механическая колебательная система с распределенными параметрами. Для описания источников шума используем модели линейного источника и монополя, выбор которых зависит от геометрии отрезаемого участка заготовки.

Обоснование выбора математических моделей. Модель линейного источника была выбрана для случаев, когда длина отрезаемого участка заготовки значительно превышает его поперечные размеры. Данная модель адекватно описывает излучение

звука протяженными объектами, где фазы колебаний различных участков источника складываются определенным образом, создавая характерную диаграмму направленности и частотную зависимость.

Модель монополя применена для компактных участков заготовки, где размеры источника малы по сравнению с длиной звуковой волны. Эта модель, являясь фундаментальным решением волнового уравнения, точно описывает сферическое излучение от точечного пульсирующего объекта, что соответствует физике процесса при отрыве мелких стружек или колебаниях малых элементов.

Модель балки на упругом основании использована для участка заготовки, закрепленного на столе станка, так как она учитывает не только внутреннюю жесткость материала, но и упругое взаимодействие с опорой, что существенно влияет на собственные частоты и формы колебаний.

Модель консольно-закрепленного элемента выбрана для описания динамики отрезаемого участка заготовки и оправки фрезы, поскольку их крепление является жестким только с одной стороны, что порождает характерный спектр собственных частот и соответствующие им формы изгибных колебаний.

Подход с распределенными параметрами для системы "инструмент-заготовка" был избран вместо моделей с сосредоточенными параметрами, так как он позволяет более точно учесть пространственное распределение масс и жесткостей, что критически важно для прогнозирования высокочастотных составляющих шума, определяемых локальными деформациями.

Выбор именно этого набора моделей позволил создать комплексное теоретическое описание, охватывающее все ключевые механизмы шумообразования при фрезеровании и обеспечивающее сопоставимость теоретических прогнозов с экспериментальными данными. Аналогичные подходы к моделированию акустических систем представлены в работах [9, 10, 11, 13].

Идентификация источников шума и вибрации. Перед началом фрезерования заготовки, ее часто нужно подготовить, в том числе и разрезать. Разреза-

ние может быть необходимо для придания заготовке нужной формы и размеров, удаления излишков материала, а также для создания заготовок для последующей обработки. Используются различные методы разрезания, такие как резка ленточной пилой или отрезным кругом. Если длина отрезаемого участка превышает в пять и более раз максимальный размер поперечного сечения, то в качестве модели источника шума примем линейный источник. Если длина отрезаемого участка мала, то в качестве модели источника шума примем монополю, звуковое давление которого определяется зависимостью:

$$P = 0,65 \cdot \frac{f_k \cdot V_k F}{2}, \quad (1)$$

где f_k – собственные частоты колебаний (Гц), которые для консольного участка определяются зависимостью [1]:

$$f_k = \left(\frac{2k-1}{l} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m_0}} \quad (2)$$

где E – модуль упругости, Па, J – момент инерции, м⁴; m_0 – распределенная масса, кг/м, $m_0 = \rho \cdot F$; ρ – плотность материала, кг/м³; F – площадь поперечного сечения, м², l – длина оправки, м; V_k – скорости колебаний, м/с.

С учетом вышеизложенного, получены следующие уровни звукового давления источников:

1. Пилы: $\frac{2\pi \cdot f_k}{c_0} \cdot h \leq 1$

1.1 Для соотношения $\frac{2\pi \cdot f_k}{c_0} \cdot h \leq 1$

$$L = 20 \lg B - 20 \lg R + 20 \lg \left(2,2 \cdot 10^7 \left(\frac{\pi k}{l} \right) + 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{T}{b \cdot h} \right) + 40 \lg k + 20 \lg \frac{h}{l} + 64 \quad (3)$$

1.2 Для соотношения $\frac{2\pi \cdot f_k}{c_0} \cdot h > 1$

$$L = 20 \lg B - 20 \lg R + 5 \lg \left(2,2 \cdot 10^7 \left(\frac{\pi k}{l} \right) + 1,3 \cdot 10^{-4} \frac{T}{b \cdot h} \right) + 10 \lg k - 5 \lg l + 122 \quad (4)$$

2. Отрезаемой заготовки, как линейного источника:

2.1 Для соотношения $\frac{2\pi \cdot f_k}{c_0} \cdot d \leq 1$

$$L = 20 \lg B + 80 \lg \frac{2k-1}{l} + 20 \lg \frac{EJ}{m_0} + 20 \lg F - 20 \lg R + 48 \quad (5)$$

2.2 Для соотношения $\frac{2\pi \cdot f_k}{c_0} \cdot d > 1$

$$L = 20 \lg B + 20 \lg \frac{2k-1}{l} + 5 \lg \frac{EJ}{m_0} + 5 \lg F - 20 \lg R + 118 \quad (6)$$

3. Отрезаемой заготовки как монополю:

$$L = 20 \lg V_k + 20 \lg F - 20 \lg R + 40 \lg \frac{2k-1}{l} + 10 \lg \frac{EJ}{m_0} + 74 \quad (7)$$

где d – максимальный размер поперечного сечения заготовки, м.

Зависимости уровней шумообразования и вибрации от узла резания (фрезы). Метод расчета виброскоростей основан на представлении оправки цилиндрической фрезы как системы с распределенными параметрами, на которую действуют силовые возмущения от каждого зуба. В этом случае уравнения поперечных колебаний в направлении осей OZ и OY фрезы как системы шарнирно-опертой системы имеют вид:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \alpha^2 \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \frac{2P_y}{m_0 l} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sin \frac{\pi k l_1}{l} + \sin \frac{\pi k l_2}{l} + \dots + \sin \frac{\pi k l_{z'}}{l} \right) \times \cos \left[0,1 n z^* t - \frac{2\pi}{z^*} \right] \sin \pi k x \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \alpha^2 \frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = \frac{2P_z}{m_0 l} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sin \frac{\pi k l_1}{l} + \sin \frac{\pi k l_2}{l} + \dots + \sin \frac{\pi k l_{z'}}{l} \right) \times \cos \left[0,1 n z^* t - \frac{2\pi}{z^*} \right] \sin \pi k x \quad (9)$$

где l_i – координаты расположения зуба, м; $\alpha^2 = EJ / m_0$; n – частота вращения фрезы, об/мин.

Для стали соответственно получим:

$$\alpha^2 = EJ / m_0 = 1,7 \times 10^8 d^2; m_0 = 6 \times 10^3 d^2.$$

Используя метод разделения переменных, систему дифференциальных уравнений (8), (9) приведем к виду:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 1,7 \cdot 10^8 d^2 \left(\frac{k}{l} \right)^4 = \frac{P_y}{3 \cdot 10^3 d^2 l} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sin \frac{\pi k l_1}{l} + \sin \frac{\pi k l_2}{l} + \dots + \sin \frac{\pi k l_{z'}}{l} \right) \times \cos \left[0,1 n z^* t - \frac{2\pi}{z^*} \right] \quad (10)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 1,7 \cdot 10^8 d^2 \left(\frac{k}{l} \right)^4 = \frac{P_z}{3 \cdot 10^3 d^2 l} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\sin \frac{\pi k l_1}{l} + \sin \frac{\pi k l_2}{l} + \dots + \sin \frac{\pi k l_{z'}}{l} \right) \times \cos \left[0,1 n z^* t - \frac{2\pi}{z^*} \right] \quad (11)$$

Теоретические исследования фактически позволяют обобщать конструктивные параметры системы, обеспечивающей выполнение санитарных норм шума в рабочей зоне станочников.

Установление зависимости уровней шумообразования и вибрации от обрабатываемых чугунных готовок.

Заготовку следует рассматривать в двух вариантах – как балку на упругом основании для участка заготовки, закрепленного на столе, и как консольно- закрепленный элемент для отрезаемого участка.

В первом случае дифференциальное уравнение колебаний имеет вид:

$$m_0 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 x}{\partial y^4} + jx = \frac{2P_y}{l} \cos \left[\frac{s}{t^*} t - (q-1) \frac{h}{r^*} \right] \sum \frac{\pi k z_0}{l} \sin \frac{\pi k z}{l} \sin \quad (12)$$

Производя аналогичные преобразования получим:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \left[\frac{EJ(\frac{\pi k}{l})^4}{m_0} + \frac{j}{m_0} \right] y = \frac{2P_y}{m_0 l} \cos \left[\frac{v}{r^*} t - (q-1) \frac{h}{r^*} \right] \sum \sin \frac{\pi k z_0}{l} \tag{13}$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{-2P_y v}{m_0 l r^*} \sin \left[\frac{v}{r^*} t - (q-1) \frac{2\pi}{r^*} \right] \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi k z_0}{l} \sin \frac{\pi k z}{l}}{\frac{EJ(\frac{\pi k}{l})^4}{m_0} + \frac{j}{m_0} - (\frac{v}{r^*})^2} = k_4 \sin \frac{\pi k z}{l} \tag{14}$$

Теоретические исследования фактически позволяют обосновать конструктивные параметры системы, обеспечивающей выполнение санитарных норм шума в рабочей зоне станочников.

Результаты. На основе разработанных моделей были получены следующие результаты. Теоретический расчет уровней звукового давления при фрезеровании заготовок выполнен для следующих условий.

Фрезеровалась заготовка из серого чугуна с размерами: длина -1м, ширина и высота по 0,2 м. Заготовка закреплялась в двух тисках, установленных на столе станка. Фрезерование осуществлялось торцевой фрезой диаметром 0,125 м, имеющей 12 зубьев из твердого сплава Т15К6 [2].

Обработка выполнялась при следующих режимах резания: глубина резания 1,5 мм, подача на зуб 0,15 мм/зуб, частота вращения фрезы 500 об/мин.

Поскольку фреза представляет собой консольно закрепленный элемент с длиной консольной части 0,35 м, то собственные частоты колебаний составили:

$$f_k = \left(\frac{2k-1}{2l} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot F}} = (2k-1)^2 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

Таким образом, в нормируемый диапазон

попадают частоты $f_{k1} = 1200$ Гц и $f_{k2} = 10800$ Гц.

Рассчитанные уровни звукового давления на этих частотах составляют: при $f_{k1} = 1200$ Гц $L_1 = 81$ дБ и при $f_{k2} = 10800$ Гц $L_2 = 71$ дБ.

Собственные частоты колебаний заготовки составляют:

$$f_k = \left(\frac{k}{l} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot F}} = 3 \cdot 10^2 k^2$$

, т.е. частоты $f_{k1} = 300$ Гц, $f_{k2} = 1400$ Гц, $f_{k3} = 2700$ Гц, $f_{k4} = 4300$ Гц, $f_{k5} = 7500$ Гц, $f_{k6} = 10800$ Гц.

Соответственно расчетные уровни звукового давления на этих частотах составляют:

при $f_{k1} = 300$ Гц $L_1 = 75$ дБ, при $f_{k2} = 1400$ Гц $L_2 = 85$ дБ, при $f_{k3} = 2700$ Гц $L_3 = 84$ дБ, при $f_{k4} = 4300$ Гц $L_4 = 72$ дБ, при $f_{k5} = 7500$ Гц $L_5 = 68$ дБ, при $f_{k6} = 10800$ Гц $L_6 = 66$ дБ.

Теоретические расчеты показали, что уровни звукового давления в пятой октаве формируются звуковой энергией заготовки, в шестой октаве звуковой энергией фрезы и заготовки, в седьмой и восьмой октавах звуковой энергией заготовки, а в девятой октаве звуковой энергией фрезы и заготовки.

Расчетный и экспериментальный спектры шума приведены на рисунке 1.

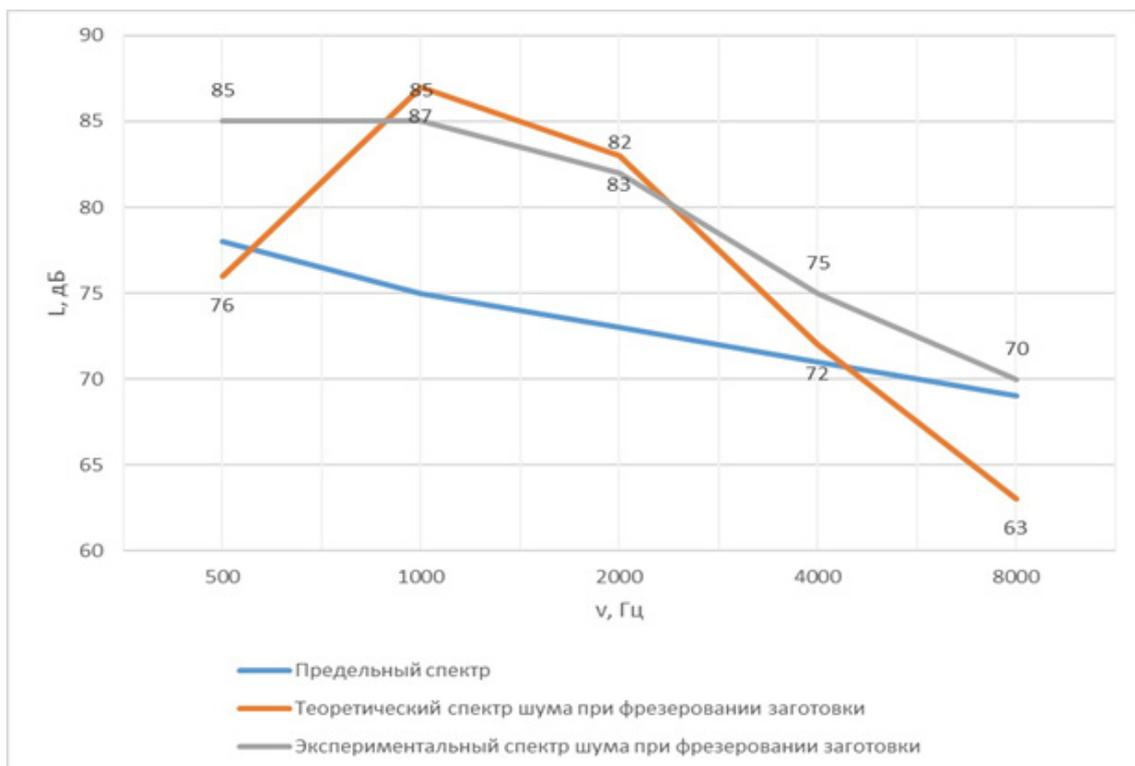


Рисунок 1 – Теоретический и экспериментальный спектры шума при фрезеровании заготовки

Таким образом, экспериментальные данные подтвердили правильность теоретических выводов о закономерностях шумообразования, так как разница между теоретическими и экспериментальными уровнями звукового давления в диапазоне частот 1000 Гц – 4000 Гц не превышает $\pm 2...3$ дБ.

Обсуждение. Проведенное исследование позволило установить тесную взаимосвязь между теоретически предсказанными и экспериментально измеренными уровнями звукового давления при фрезеровании чугунных заготовок. Полученное расхождение в пределах $\pm 2...3$ дБ в критическом частотном диапазоне 1000–4000 Гц свидетельствует о высокой адекватности разработанных аналитических моделей. Такая точность предсказания является существенным достижением, учитывая сложность физических процессов, сопровождающих прерывистое резание хрупких материалов.

Сравнение полученных результатов с данными предыдущих исследований [3–5] выявило важную закономерность: уровни шума при фрезеровании чугуна сопоставимы с показателями при абразивной обработке сварных соединений. Это сходство позволяет предположить универсальность механизмов шумообразования при различных видах механической обработки, что открывает возможности для разработки общих подходов к снижению шума. В частности, методика математического моделирования, примененная в данном исследовании, может быть адаптирована для других технологических процессов металлообработки.

Полученные результаты согласуются с исследованиями виброакустических характеристик при абразивной обработке [6, 8], где также отмечается влияние геометрических параметров на шумообразование.

Анализ спектрального состава шума показал четкое распределение источников звуковой энергии по частотным диапазонам. В низкочастотной области (300–750 Гц) доминирующий вклад вносит заготовка, что объясняется ее значительной массой и размерами. В среднечастотном диапазоне (1200–4300 Гц) наблюдается совместное излучение фрезы и заготовки, причем максимальные уровни звукового давления достигаются именно в этой области. Высокочастотные составляющие (7500–10800 Гц) формируются преимущественно инструментом, что согласуется с его меньшими геометрическими размерами и более высокими собственными частотами.

Установленное превышение санитарных норм (в отдельных случаях до 12 дБА) имеет серьезные практические последствия. Такие уровни шума не только создают дискомфортные условия труда, но и представляют реальную опасность для здоровья операторов при длительном воздействии. Особую тревогу вызывает тот факт, что наиболее значительное превышение наблюдается в частотном диапазоне 1400–2700 Гц, который наиболее вредно воздействует на человеческий слух.

На основе анализа механизмов шумообразова-

ния можно предложить два основных направления снижения шума. Первое связано с вибродемпфированием оправок фрез, что позволит снизить энергию колебаний в источнике. Второе направление предполагает использование локальных акустических экранов, эффективных именно в наиболее проблемных частотных диапазонах. При этом разработанные математические модели позволяют оптимизировать параметры этих средств защиты еще на этапе проектирования технологического процесса.

Необходимо отметить, что некоторые отклонения между теоретическими и экспериментальными данными могут быть обусловлены неучтенными в моделях факторами, такими как неидеальность закрепления заготовки, износ режущего инструмента и влияние окружающей среды. Эти аспекты требуют дополнительного исследования и могут стать предметом дальнейших научных изысканий.

В целом, проведенное исследование демонстрирует возможность точного прогнозирования шумовых характеристик процессов механической обработки на основе фундаментальных физических принципов. Полученные результаты создают научную основу для разработки эффективных мер по снижению шума в металлообрабатывающих производствах и могут быть использованы при проектировании как новых станков, так и систем шумоподавления для существующего оборудования.

Выводы. Получены аналитические зависимости, учитывающие геометрические и физико-механические параметры источников шума и позволяющие определить ожидаемые уровни звукового давления на их собственных формах колебаний, что фактически позволяет теоретически рассчитать спектры шума на этапе проектирования технологических процессов фрезерования на всех типах вышеуказанных фрезерных станков. Такие данные являются необходимой информацией для проектирования и расчета акустической эффективности систем снижения шума по критерию выполнения санитарных норм шума на рабочих местах станочников.

Получены экспериментальные результаты исследования шума металлорежущих фрезерных станков при обработке чугунных заготовок [2]. Исследования показали, что существующие станки создают повышенное звуковое давление в диапазоне частот от 250 до 8000 Гц, при этом уровень звукового давления достигает 80–92 дБА, что превышает предельно допустимый уровень (80 дБА) на 0–12 дБА.

В более высокочастотной области спектра снижение интенсивности звукового излучения составляет от 4 до 7 дБ на октаву. Полученные данные являются исходной информацией для расчёта систем шумоподавления с учётом требований санитарных норм. Для упрощения инженерных расчётов приведены коэффициенты потерь энергии колебаний для сплошных и полых чугунных изделий.

Сравнение полученных данных с ранее прове-

денными исследованиями [3-5] показало, что уровень шума металлорежущих станков при фрезеровании чугуна сопоставим с результатами данных по абразивной обработке сварных соединений транспортных машин. Это позволяет применить ту же теоретическую методику исследования и предложить аналогичные методы снижения шума.

Полученные данные являются исходной информацией для расчета систем шумоподавления с учетом соблюдения санитарных норм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чукарин А.Н. Теория и методы акустических расчетов и проектирования технологических машин для механической обработки / А.Н. Чукарин; Федер. агентство по образованию, Государств. образоват. учреждение высш. проф. образования Дон. гос. техн. ун-т. – Ростов н/Д : Изд. центр ДГТУ, 2005. – 151 с.
2. Beskopylny A.N., Chukarin A.N., Meskhi B.Ch., Dzhedirov D.A. Experimental Studies of Noise and Vibration During Milling of Cast Iron Parts // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 458. – Art. 04082. – (International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) "Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution").
3. Чукарин А.Н., Бескопильный А.Н., Исаев А.Г. Исследования виброакустических характеристик в рабочей зоне оператора при абразивной обработке сварных швов // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 11. – С. 7-12.
4. Beskopylny A.N., Chukarin A.N., Kurchenko P., Isaev A.G. Vibroacoustic Characteristics of Abrasive Processing of Welded Joints of Transport Machines // Transportation Research Procedia. – 2022. – Vol. 63. – P. 2529–2534.
5. Beskopylny A.N., Chukarin A.N., Meskhi B.Ch., Isaev A.G. Improving the Environmental Safety of Transport Technologies by Reducing Noise During Abrasive Processing // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 54. – P. 39-46.
6. Яицков, И.А. О расчете спектров вибраций и шума тонкостенных оболочек на примере капотов силовых установок и при абразивной обработке сварных швов кузовных конструкций локомотивов / И.А. Яицков, С.А. Раздорский // Современные фундаментальные и прикладные исследования. – 2017. – № 4-1(27). – С. 191-196. – EDN YPBVGD.
7. Кушцова, И.С. Акустическая модель системы "шлифовальный круг - заготовка" обдирочно-шлифовального станка / И.С. Кушцова // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 2(24). – С. 183-187. – EDN DYCDIE.
8. Modeling of Vibroacoustic Characteristics of Plate Structures of Vehicles during Abrasive Processing / A. Beskopylny, A. Chukarin, B. Meskhi, A. Isaev // Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 25–29 мая 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 39-46. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.02.045. – EDN FNOBNH.
9. Обоснование выбора моделей источников шума протяжных и сверлильно-фрезерно-расточных станков / М.В. Алексеев, М.В. Гричишин, А.Н. Чукарин, Т.А. Финоченко // Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 5(293). – С. 3-5. – EDN YCPYMA.
10. Разаков, Ж.П. Расчет акустических характеристик заготовок резьбошлифовальных и шлицшлифовальных станков для расчета уровней шума на рабочем месте / Ж.П. Разаков // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 5(27). – С. 91-99. – EDN NFKLCX.
11. Курченко, П.С. Вывод зависимостей скоростей колебаний узла обработки для определения акустических характеристик металлообрабатывающих станков / П.С. Курченко // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7, № 2(24). – С. 208-217. – EDN KLYIRG.
12. Голосной, С.В. Экспериментальные исследования спектров шума и вибрации копировально-фрезерных станков / С.В. Голосной, А.Н. Чукарин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 4(87). – С. 79-85. – DOI 10.12737/22151. – EDN XRZMWZ.

13. А.В. Будовский, Ю.И. Булыгин, А.В. Павликов, А.В. Трюхан Снижение виброакустической активности плавучих средств при использовании вибродемпфирующих материалов // Безопасность техногенных и природных систем. – 2023. – № 1. – С. 28-38. – DOI 10.23947/2541-9129-2023-1-28-38.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 504.3.054; 543.054

EDN: WZYTPX

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕТЕРМИНИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСОВ ОТ
СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕСОВ
САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ КАРТЫ КОХОНЕНА**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 6169-8590

Author ID: 448228

ORCID: 0000-0002-1313-6826

Scopus ID: 55895350100

WoS Researcher ID: P-7345-2015

ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна, доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)

SPIN: 4039-4139

Author ID: 1213161

ORCID: 0009-0009-2883-7359

ПАТРИКЕЕВ Денис Николаевич, аспирант кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail patrikeevdn@list.ru)

SPIN-код: 7802-8001

Author ID: 655035

КОЗОДАЕВ Алексей Станиславович, доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
(105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, E-mail kozodaevas@mail.ru)

Аннотация. Исследование посвящено разработке и обоснованию методики анализа многомерных данных экологического мониторинга атмосферного воздуха на основе самоорганизующихся карт Кохонена (*SOM*). В работе формализован подход, позволяющий определять относительную значимость параметров на основе весов нейронов *SOM* модели в процессе обучения. Эмпирической базой послужили официальные данные государственной статистической отчетности 2-ТП (воздух). Наиболее значимыми признаками, определяющими топологию *SOM*, оказались летучие органические соединения, оксид азота и диоксид серы. Полученные веса признаков были использованы в качестве дополнительных переменных в архитектуре нейросети *LSTM*, обученной на задачах краткосрочного прогноза выбросов загрязняющих веществ. Сравнительный анализ моделей показал повышение точности предсказаний при включении информации о весах признаков и принадлежности кластерам. Предложенный метод обладает высокой интерпретируемостью и может быть использован для формирования научно обоснованных рекомендаций по управлению качеством атмосферного воздуха.

Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязнение воздуха, кластеризация, окружающая среда, нейронные сети, *LSTM*.

**PREDICTION OF THE DETERMINING PARAMETERS OF EMISSIONS FROM STATIONARY
SOURCES USING KOHONEN SELF-ORGANIZING MAP WEIGHTS**

© The Author(s) 2025

TARANTSEVA Klara Rustemovna, doctor of technical sciences, professor,
head of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety
Penza State Technological University
(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)

PATRIKEEV Denis Nikolayevich, postgraduate student of the Department
of Biotechnology and Technosphere Safety
Penza State Technological University
(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: patrikeevdn@list.ru)

KOZODAEV Alexey Stanislavovich, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Department of Ecology and Industrial Safety
Bauman Moscow State Technical University (National Research University)
(105005, Moscow, 2nd Baumanskaya St., 5, building 1, E-mail kozodaevas@mail.ru)

Abstract. The research is devoted to the development and substantiation of methodology for analyzing

multidimensional environmental air monitoring data based on self-organizing Kohonen maps (*SOM*). The paper formalizes an approach that makes it possible to determine the relative importance of parameters based on the weights of *SOM* model neurons in the learning process. The empirical basis was the official data of the 2-TP (air) state statistical reporting. The most significant features defining the *SOM* topology were volatile organic compounds, nitrogen oxide and sulfur dioxide. The obtained feature weights were used as additional variables in the architecture of the *LSTM* neural network, trained on the tasks of short-term forecasting of pollutant emissions. A comparative analysis of the models showed an increase in the accuracy of predictions when information on feature weights and cluster membership was included. The proposed method is highly interpretable and can be used to form scientifically sound recommendations for atmospheric air quality management.

Keywords: environmental monitoring, air pollution, clustering, environment, neural networks, *LSTM*.

Для цитирования: Таранцева К.Р. Прогнозирование детерминирующих параметров выбросов от стационарных источников с использованием весов самоорганизующейся карты Кохонена / К.Р. Таранцева, Д.Н. Патрикеев, А.С. Козодаев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 170-176. – EDN: WZYTPX.

Введение. Разработка научных основ систематизации и ранжирования загрязнений по степени опасности для окружающей среды по показателям экологического риска является одной из задач экологической безопасности. Сложная и высокоразмерная структура процессов атмосферного загрязнения в условиях антропогенного воздействия обуславливает необходимость использования адаптивных аналитических методов, способных извлекать скрытые закономерности из данных измерений.

Одним из перспективных подходов к кластеризации многомерных экологических данных являются самоорганизующиеся карты Кохонена (*Self-Organizing Maps, SOM*), отличающиеся способностью формировать топологические проекции высокоразмерных пространств. Современные исследования подтверждают эффективность применения *SOM* в задачах анализа загрязнений атмосферы и гидросферы [1-8]. Кроме того, модели *SOM* успешно применяются в сочетании с полносвязной нейронной сетью (*MLP*) [8, 9], для зонирования урбанизированных территорий по уровню загрязнения воздуха [10] и ранжирования по другим показателям [11].

Несмотря на доказанную эффективность *SOM* в кластеризации многомерных данных, недостаточно проработанным остаётся вопрос интерпретации внутренних весов модели и выделения признаков, играющих определяющую роль в формировании кластерной структуры. Анализ этих весов позволяет оценить относительную значимость переменных без привлечения экспертных оценок или размеченных выборок.

Целью настоящего исследования является формализация методики выделения наиболее значимых параметров на основе весов нейросетевой модели для последующего формирования прогнозов и рекомендаций по оптимизации процессов управления качеством воздуха и минимизации экологических рисков. Достижение этой цели может помочь увеличить точность нейросетевых прогнозов выбросов стационарными источниками, а также помочь составить ранжированные списки

загрязняющих веществ в воздухе [12, 13].

Актуальность работы обусловлена необходимостью улучшения методов ранжирования загрязняющих веществ и выявления критически значимых факторов, а также необходимостью перехода от статических и усреднённых подходов в контроле загрязнения воздуха к интеллектуальным моделям.

В рамках исследования были идентифицированы признаки, обладающие наибольшим и наименьшим вкладом в формирование кластерной структуры, путём анализа внутренних весов, полученных в процессе обучения *SOM*. С использованием этих данных были обучены 2 нейронные сети с последующим сравнением их прогнозов.

Методология. Для реализации поставленных задач использовались официальные государственные данные экологического мониторинга атмосферного воздуха, представленные в форме федеральной статистической отчётности 2-ТП (воздух) за период с 2011 по 2023 год, охватывающие территорию Пензенской области. Данный массив данных получен из Автоматизированной информационной системы экологического мониторинга и включает показатели выбросов от стационарных источников по основным загрязняющим веществам, зарегистрированным на уровне муниципальных образований [16, 17].

На первом этапе данные были подвергнуты процедурам предварительной очистки, нормализации и устранения пропусков. Далее подготовленные данные использовались для обучения модели *SOM*, в ходе чего происходило формирование кластерной структуры на основе внутренних весов нейронов. Визуализация результатов представлена в форме тепловых карт, каждая ячейка которых соответствует конкретному нейрону (или кластеру) *SOM*, а цветовая интенсивность кодирует значение соответствующего весового коэффициента (рис. 1).

Ранжирование переменных по степени их вклада в кластерную структуру осуществлялось на основе количественного анализа весов, ассоциированных с нейронами *SOM*, что позволило избежать субъективных экспертных оценок и опереться на внутреннюю логику модели.

За основу взята методика исследований моделей SOM примененных ранее для комплексной оценки качества воздуха [2, 18].

Расположение нейронов в пространстве карты определяется конкурентным механизмом обучения. Полученные после завершения фазы обучения веса нейронов отражают вклад каждого признака в формирование соответствующего кластера. Весовые

коэффициенты служат основой для дальнейшего анализа значимости переменных.

Важно, что каждому нейрону соответствует не одно наблюдение, а группа входных показателей, которые он объединил в процессе обучения.

Это значит, что каждый признак может быть представлен в виде тепловой карты влияния на кластеры (рис. 2).

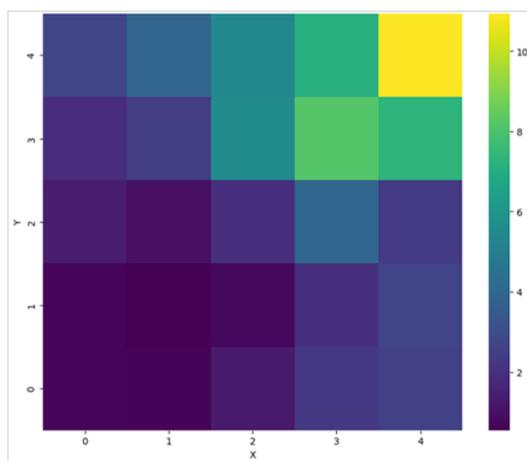


Рисунок 1 – Тепловая карта кластеров по данным экологического мониторинга атмосферного воздуха Пензенской области

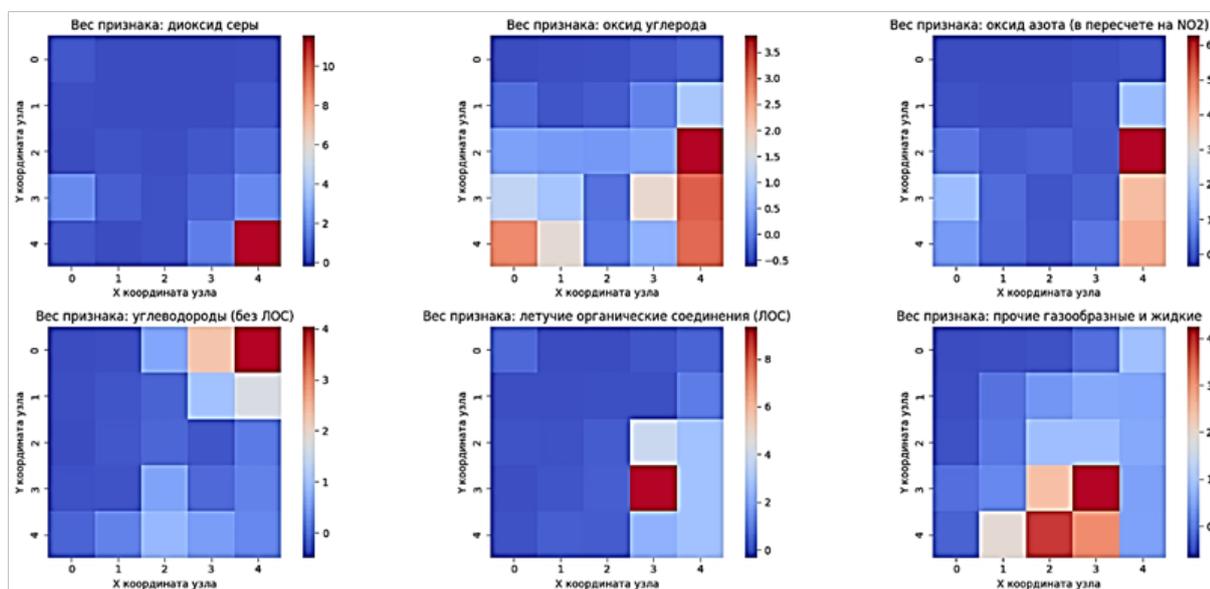


Рисунок 2 – Тепловые карты влияния признаков на кластеры

Результаты. Результаты количественной оценки вклада каждого признака, выполненной на основе нормированного среднего абсолютного отклонения (*MAD*), подтверждают ключевую роль следующих веществ: летучие органические соединения (вклад 0.2214), оксид азота (в пересчёте на NO_2) – 0.1793, оксид углерода – 0.1651, диоксид серы – 0.1629, прочие газообразные и жидкие вещества – 0.1610. Наименьшее значение было зафиксировано у углеводородов без ЛОС – 0.1103. Эти данные демонстрируют распределение значимости признаков в

формировании топологической структуры карты и могут быть использованы при разработке приоритетных стратегий экологического контроля.

Эмпирическая верификация разработанной методики осуществлялась на наборах данных, ранее использованных в исследованиях, ориентированных на построение цифровых двойников динамики выбросов, что обеспечило воспроизводимость и валидность результатов.

В качестве верификационного примера использованы результаты работы Зупаровой В.В. и соав-

торов, в рамках которой был разработан цифровой двойник, имитирующий динамику выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух Пензенской области [20].

Авторы указанной работы, опираясь на официальные отчёты формы 2-ТП (воздух) за 2020-2024 годы [16, 17], осуществили прогноз выбросов загрязняющих веществ на 2025 год, применяя алгоритмы линейной регрессии, метода ближайших соседей (KNN) и случайного леса. С целью проверки работоспособности разработанного в настоящем исследовании подхода, для моделирования был выбран показатель объёма выбросов оксида азота, ввиду его значительного вклада в кластерную структуру (0.1793), сопоставимого с максимальным значением, зафиксированным у летучих органических соединений (ЛОС) – 0.2214.

Учитывая ярко выраженную временную динамику выбросов, в качестве модели прогнозирования

использовалась нейросетевая архитектура с долговременной краткосрочной памятью (LSTM) [19]. Были построены две версии модели: первая обучалась на исходных табличных данных, полученных из официальной отчётности [16, 17]; вторая – на тех же данных, но с дополнительным включением весов загрязнителя, рассчитанных на основе SOM, и координат кластера, в котором наблюдается наибольший вклад соответствующего признака.

Прогнозирование объёма выбросов оксида азота на 2024 год (рис. 3, 4) показало, что модель, обученная с применением весов SOM, характеризуется меньшей среднеквадратичной ошибкой ($MSE = 9934$) по сравнению с моделью, обученной без использования этих весов ($MSE = 14142$).

На следующем этапе были осуществлены прогнозы объёмов выбросов оксида азота на 2025 год (рис. 5, 6) с исключением фактических значений из обучающего набора.



Рисунок 3 – Сравнение значений выбросов на 2024 год с данными из отчётов

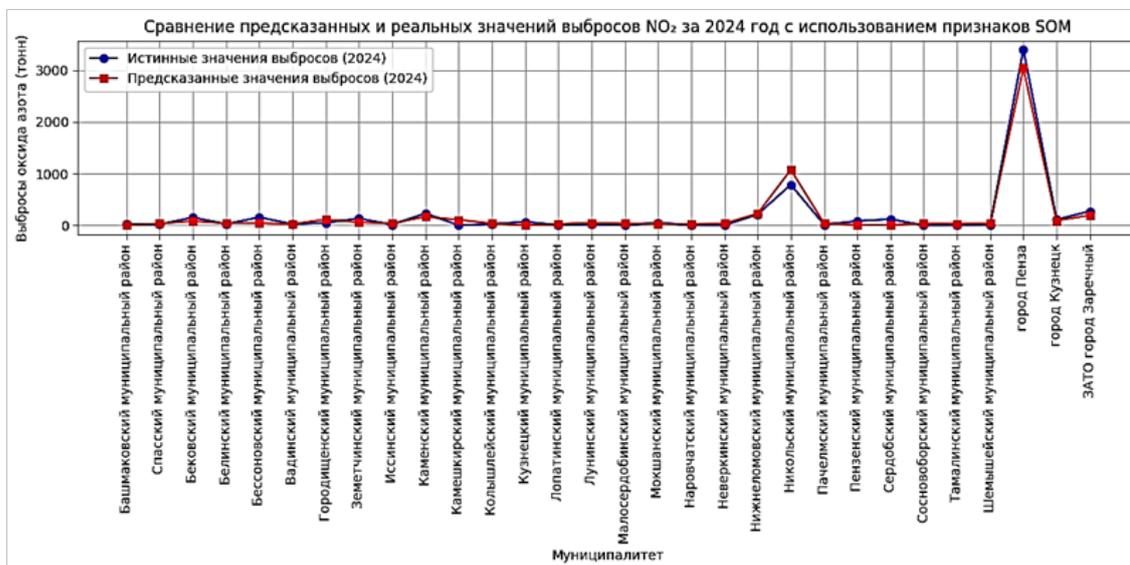


Рисунок 4 – Сравнение значений выбросов на 2024 год с данными из отчётов с использованием весов SOM



Рисунок 5 – Прогноз выбросов на 2025 с данными из отчётов

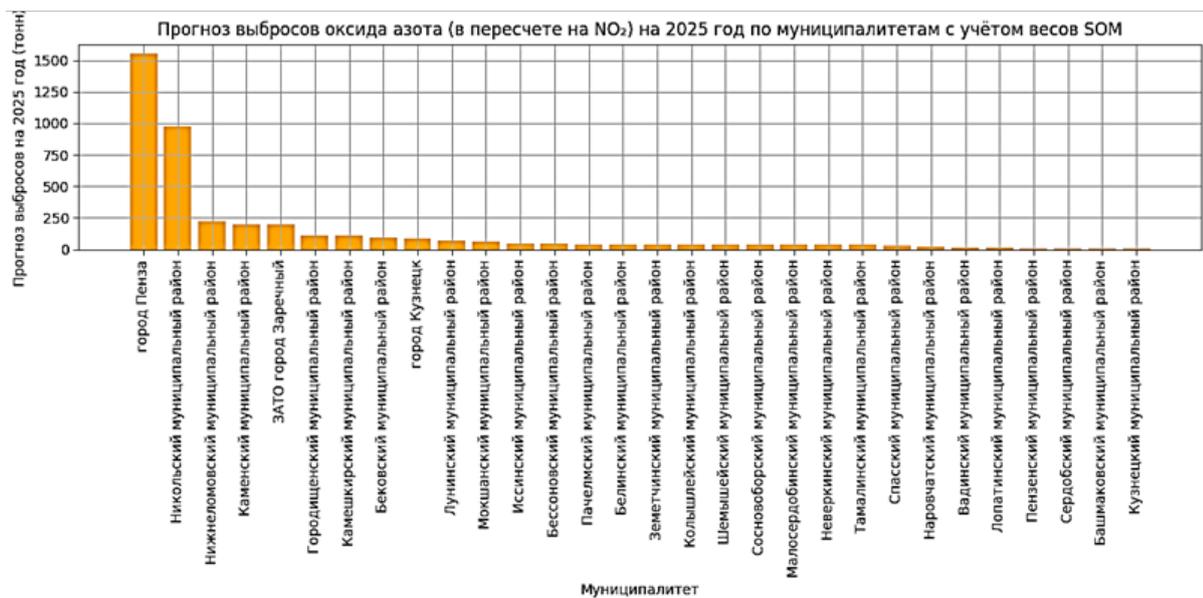


Рисунок 6 – Прогноз выбросов на 2025 с данными из отчётов с использованием весов SOM

Обсуждение. Анализ кластерной структуры, сформированной в результате обучения карты, показал наличие двух принципиально различных типов кластеров. Первый тип представлен нейронами, в которых доминирует один признак, обладающий максимальным весом, что указывает на его ведущую роль в формировании локальной структуры данных. Второй тип отличается высокой совокупной значимостью сразу нескольких признаков, распределённых в пределах одного нейрона, что свидетельствует о сложной взаимосвязанной природе загрязнения в соответствующих экологических условиях [8, 18].

Обе модели (рис. 3 и 4) продемонстрировали высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0.979296$ и 0.958666 соответственно), что свидетельствует об адекватной аппроксимации наблюдаемых данных.

Например, фактический объём выбросов оксида азота в 2024 году в г. Пенза составил 3403.71 тонн; соответствующее значение, полученное по модели с применением весов SOM, составило 3040.37 тонн, тогда как предсказание модели без использования этих весов – 2788.03 тонны.

Несмотря на определённые расхождения между моделями и эмпирически зафиксированными значениями, обусловленные как методологическими различиями, так и ограниченным объёмом доступных данных, обобщённые результаты оказались сопоставимыми с ранее опубликованными оценками [20] (табл. 1).

При сравнении прогнозируемых значений объёмов выбросов NO₂ в разрезе муниципальных образований Пензенской области наблюдается тенденция к более высокой точности предсказаний у

модели, в которую были включены веса, полученные с помощью SOM. В частности, по г. Пенза модель с использованием весов предсказала 1551.79 тонны, тогда как модель без этих весов – 1806.14 тонны, при ориентировочном значении, предложенном в [20], равном ≈ 3300 тонн.

Полученные в ходе исследования результаты формируют научно обоснованную основу для разработки приоритетных управленческих решений, направленных на улучшение качества воздушных ресурсов, выявление критически значимых загряз-

няющих веществ, а также повышение эффективности деятельности органов экологического контроля [21, 22].

Всё это в целом позволит повысить экологическую безопасность региона [22-24]. В дальнейшем планируется расширение входного пространства за счёт интеграции факторов, не охваченных в текущем исследовании [10, 12, 17, 18, 21-27], использование весов SOM в других задачах экологического мониторинга [28-31] и интеграция подхода в системы экологического надзора.

Таблица 1 – Результаты прогнозирования выбросов NO₂ на 2025 год

Муниципальное образование	Прогноз NO ₂ [20]	Прогноз NO ₂ без весов SOM	Прогноз NO ₂ с весами SOM
город Пенза	≈ 3300	1806.14	1551.79
Никольский м. р.	≈ 800	832.46	976.46
ЗАТО город Заречный	около 450	164.51	197.45
Нижнеломовский м. р.	около 350	209.32	221.53
Каменский м. р.	около 300	256.37	199.10
Бековский м. р.	около 250	135.38	91.54
Бессоновский м. р.	около 200	106.87	44.05
Сердобский м. р.	около 180	20.33	6.92
Мокшанский м. р.	около 160	146.59	62.13
город Кузнецк	около 140	124.36	88.72

Выводы. Предложена методика определения наиболее значимых загрязнителей воздуха на основе анализа весов нейронов SOM. Выделены группы параметров с максимальным и минимальным вкладом в обученную модель.

Разработанный подход позволяет формировать обоснованные рекомендации по выбору приоритетных направлений экологического контроля, определению критически значимых загрязнителей и повышению эффективности надзора за качеством атмосферного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кремлева Э.Ш. Модели и методы интеллектуальной обработки данных для систем поддержки принятия решений (на примере систем экологической безопасности): автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2021.
2. Шагидуллин А.Р. Методы и средства систем локального экологического мониторинга качества атмосферного воздуха высокоурбанизированных территорий на основе сквозных цифровых технологий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды / А.Р. Шагидуллин. – Казань, 2023. – 52 с.
3. Licen S., Astel A., Tsakovski S. Self-organizing map algorithm for assessing spatial and temporal patterns of pollutants in environmental compartments: A review // Science of The Total Environment. – 2023. – Т. 878. – С. 163084.
4. Патрикеев, Д.Н. Анализ влияния производства волокон на загрязнение водных ресурсов / Д.Н. Патрикеев, К.Р. Таранцева // Проблемы техносферной и экологической безопасности в промышленности, строительстве и городском хозяйстве: Материалы III Международной научной конференции, Макеевка, 13 февраля 2025 года. – Макеевка: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры", 2025. – С. 364-366. – EDN TFUYOW.
5. Оспанова Ф.Р. Аналитика качества воздуха на основе искусственного интеллекта // Состав редакционной коллегии и организационного комитета. – 2024.

6. Тунакова Ю.А. и др. Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования // Материалы конференции: Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. Белгород, 23-27 октября 2023 года.

7. Попова О.Н., Глебова Ю.М. Мониторинг и оценка качества урбанизированных территорий на основе методов нейросетевого моделирования и ГИС // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – №. 11. – С. 47-59.

8. Пастухов А.А., Прокофьев А.А. Применение алгоритмов кластеризации к формированию представительской выборки для обучения многослойного перцептрона // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2017. – Т. 10. – №. 2. – С. 58-68.

9. Тунакова Ю.А. и др. Нейросетевой алгоритм и гибридная модель для расчета концентраций парникового газа диоксида углерода // Системы контроля окружающей среды. – 2023. – №. 3. – С. 53.

10. Использование архитектурно-конструктивных решений для обеспечения экологической безопасности территорий городов / Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, А.Р. Шагидуллин, С.Ю. Морайш Иванова // Химия и инженерная экология - XXI: Сборник трудов международной научной конференции (школа молодых ученых), посвященной 90-летию казанского национального исследовательского технического университета им. а.н. туполева - кат и 60-летию создания института автоматизации и электронного приборостроения КНИТУ-КАИ, Казань, 28-30 сентября 2021 года. – Казань: ИП Сагеева А.Р., 2021. – С. 266-271.

11. Первухина, А.Д. Кластеризация районов юга Тюменской области по комплексу экологических показателей / А.Д. Первухина, Н.Г. Малышкин // Достижения молодежной науки для агропромышленного комплекса: Сборник трудов LVII научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 27 февраля 2023 года. Том Часть 3. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2023. – С. 139-148. – EDN QWNTLT.

12. Tavakolizadeh N., Bagheri M. Multi-attribute selection for salt dome detection based on SVM and MLP machine learning techniques // Natural Resources Research. 2022. Т. 31. №. 1. С. 353-370.

13. Ибрагимов А.А. и др. Системы контроля окружаю-

щей среды // Системы контроля окружающей среды Учредители: Институт природно-технических систем. №. 4. С. 111-117.

14. Табаров С.Ф. Модель системы мониторинга и анализа состояния окружающей среды на примере субъектов РФ // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Т. 8. №. 2. С. 207-226.

15. Бугубаева А.Ж. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа данных для системы мониторинга атмосферного загрязнения: дис. – Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD). – Усть-Каменогорск, 2022. – 91с.

16. Информация об охране атмосферного воздуха [Электронный ресурс] // Росприроднадзор. – URL: <https://grn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/> (дата обращения: 22.05.2025).

17. Форма 2-ТП (воздух) – Сведения об охране атмосферного воздуха [Электронный ресурс] // ЕМИСС. – URL: <https://fedstat.ru/form/10230> (дата обращения: 22.05.2025).

18. Смирнов А.Ю., Рыбников П.А. Поиск геохимических аномалий и определение источников загрязнения воздуха на примере промышленного предприятия (средний Урал) // Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений. 2020. С. 78-81.

19. Вегера Д.В., Кудяшов А.А., Новикова А.А. Прогнозирование концентраций газов на основе рекуррентной нейронной сети //Инженерный вестник Дона. – 2024. – №. 7 (115). – С. 56.

20. Зупарова В.В. Пространственно-временной анализ загрязнения воздуха с использованием цифрового двойника //Инновационная наука. – 2025. – №. 8-1. – С. 116-118.

21. Сограби Т.В. и др. Контроль загрязнения атмосферы при помощи искусственного интеллекта //Экологическая безопасность в техносферном пространстве. – Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2024. – С. 253-259.

22. Иманбаев А. Интеллектуальная система прогнозирования качества воздуха на основе гибридных нейросетевых моделей //XIII научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых. Том СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. 256 с. – 2025. – Т. 15. – С. 37.

23. Рыбак В.А. Построение моделей влияния качества окружающей среды на здоровье населения // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1. Математика. Механика. Информатика. – 2024. – №. 4 (53). – С. 39-51.

24. Кокоулин А.Н., Загороднов С.Ю., Южаков А.А. К новым методам измерения и распознавания микрочастиц пыли в атмосферном воздухе //Анализ риска здоровью. – 2023. – №. 1. – С. 36-45.

25. Шагидуллин А.Р. Средства обработки данных для определения концентраций парникового газа диоксида углерода в приземном слое атмосферного воздуха // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2025. – №. 4 (52). – С. 68-76.

26. Дель И.В., Старченко А.В. Использование методов нейросетевого моделирования для прогнозирования качества атмосферного воздуха //Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – №. 65. – С. 15-24.

27. Галицына А.А., Макаров К.С. Исследование состояния воздуха в городе Курске с применением технологий больших данных // ББК 32.973 И 73. – С. 70.

28. Ярушев С.А. и др. Прогнозирование временных рядов на основе гибридных нейронных сетей // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2016. – №. 12. – С. 233-246.

29. Потапов А.Б., Али М.К. Нелинейная динамика обработки информации в нейронных сетях // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2001. – Т. 9. – №. 6. – С. 3-44.

30. Nasiruddin M. et al. Distribution, sources, and pollution levels of toxic metal (loid) s in an urban river (Ichamati), Bangladesh using SOM and PMF modeling with GIS tool // Environmental Science and Pollution Research. – 2023. – Т. 30. – №. 8. – С. 20934-20958.

31. Гершелис Е.В. и др. Органическое вещество донных осадков моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря: обзор результатов пиролиза // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – №. 4. – С. 149-162.

Статья поступила в редакцию 25.09.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 622.874

EDN: SIDVUM

РАДОНовый МОНИТОРИНГ НА ШАХТАХ КУЗНЕЦКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 5251-6351

AuthorID: 352624

ORCID: 0000-0003-2074-9695

ResearcherID: AAI-1662-2019

ScopusID: 57196279711

КОРШУНОВ Геннадий Иванович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Безопасности производств»

*Санкт-Петербургский горный университет**(199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail.ru: korshunov_gi@pers.spmi.ru)*

SPIN: 2212-4467

AuthorID: 643819

ORCID: 0000-0003-3543-1575

ResearcherID: A-4587300

ScopusID: 56669751300

МИРОНЕНКОВА Наталья Александровна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасности производств»

*Санкт-Петербургский горный университет**(199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: Mironenkova_NA@pers.spmi.ru)***ПОЛЕЩУК Анастасия Андреевна**, аспирант*Санкт-Петербургский горный университет**(199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail.ru: poleshuck.nas@yandex.ru)*

Аннотация. В статье представлены результаты комплексных исследований радиационной обстановки на предприятиях Кузнецкого угольного бассейна (шахты им. В.Д. Ялевского и «Талдинская-Западная 1»). Целью работы являлся анализ пространственно-временной динамики плотности потока радона (ППР) с поверхности для разработки усовершенствования системы мониторинга и последующего прогноза радиационными рисками. В ходе полевых работ 2025 года была применена методика параллельных измерений ППР с различным временным интервалом (1, 2, 3, 6 и 24 часа), позволившая оценить краткосрочную изменчивость и получить усредненные интегральные показатели. Проведены измерения объемной активности радона в подземных выработках для выявления корреляционных связей. Установлено, что за период с 2021/2022 по 2025 год значения ППР на исследованных шахтах возросли в 5-20 раз, достигнув в отдельных точках 260 мБк/м²·с. Выявлена корреляция между значениями ППР на поверхности и объемной активностью в атмосфере подземных горных выработок, что подтверждает общность источников газовой выделению и миграционных путей. Предложены практические рекомендации по совершенствованию системы мониторинга. Результаты исследования имеют практическую значимость для повышения безопасности труда и снижения уровня профессиональных заболеваний среди работников угольных шахт. Совершенствование методики позволит своевременно принимать превентивные меры по защите персонала.

Ключевые слова: радон, плотность потока радона (ППР), объемная активность (ОА), эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона, радоноопасность, мониторинг, адсорбция, радиационная безопасность, прогнозирование, газовая съемка, экспонирование, угольные шахты.

RADON MONITORING AT THE MINES OF THE KUZNETSK COAL BASIN

© Author(s) 2025

KORSHUNOV Gennady Ivanovich, doctor of technical sciences,

professor of the Department of Industrial Safety

*St. Petersburg Mining University**(199106, Russia, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line 2, e-mail.ru: korshunov_gi@pers.spmi.ru)***MIRONENKOVA Natalia Alexandrovna**, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of Industrial Safety

*St. Petersburg Mining University**(199106, Russia, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line 2, e-mail.ru: Mironenkova_NA@pers.spmi.ru)***POLESHCHUK Anastasia Andreevna**, postgraduate student*St. Petersburg Mining University (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line 2,**e-mail.ru: poleshuck.nas@yandex.ru)*

Abstract. The article presents the results of comprehensive studies of the radiation situation at the enterprises of the Kuznetsk coal basin (mines named after V.D. Yalovsky and «Taldinskaya-Zapadnaya 1»). The aim of the work

was to analyze the spatiotemporal dynamics of radon flux density from the surface in order to develop improvements in the monitoring system and subsequent prediction of radiation risks. During the fieldwork in 2025, the technique of parallel measurements of PPR with different time intervals (1, 2, 3, 6 and 24 hours) was applied, which made it possible to assess short-term variability and obtain averaged integral indicators. Measurements of the volumetric activity of radon in underground workings were carried out to identify correlations. It was found that during the period from 2021/2022 to 2025, the values of the MPR in the studied mines increased by 5-20 times, reaching 260 MBq/m²·s at some points. A correlation has been revealed between the values of PPR on the surface and the volumetric activity in the atmosphere of underground mine workings, which confirms the commonality of gas emission sources and migration routes. Practical recommendations for improving the monitoring system are proposed. The results of the study are of practical importance for improving occupational safety and reducing occupational diseases among coal mine workers. Improving the methodology will make it possible to take timely preventive measures to protect personnel.

Keywords: radon; radon flux density (RR); volumetric activity (OA); equivalent equilibrium volumetric activity (EROA) of radon; radon hazard; monitoring; adsorption; radiation safety; forecasting; gas survey; exposure; coal mines.

Для цитирования: Коршунов Г.И. Радоновый мониторинг на шахтах Кузнецкого угольного бассейна / Г.И. Коршунов, Н.А. Мироненкова, А.А. Полещук // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 177-183. – EDN: SIDVUM

Введение. Угольная промышленность, является важной для экономики России и относится к категории производств с повышенным уровнем профессиональной опасности [1, 2]. В то время как основные усилия по обеспечению безопасности персонала традиционно сконцентрированы на снижении рисков аварийного характера (взрывометаноопасность, внезапные выбросы, горные удары), потенциальная опасность от источников природного происхождения часто недооценивается [3-5]. Опыт по оценке рисков и обеспечению безопасности работников, полученный в других отраслях, может быть полезен и для угольной промышленности [6-8]. Так, результаты исследования смежных областей могут быть полезными при необходимости оценки развития техногенных трещин, которые влияют на выделения рудничных газов, и оценке опасность газодинамических явлений [9-11]. Благодаря исследованиям по радиационной безопасности были установлены риски возникновения легочных патологий у шахтеров [12]. Естественный радиационный фон угольных пластов и вмещающих факторов является значимым фактором профессионального риска, который предопределяет отдаленные последствия для здоровья персонала. Совокупное действие производственных факторов, даже не превышающих нормативных значений, в течение длительного периода увеличивают риски профессиональных заболеваний [13-15].

В выработках с недостаточной вентиляцией накапливаются рудничные газы (метан, оксиды углерода и азота, радон), угольная пыль. Содержание вредных газов в воздухе горных выработок может превышать допустимые нормы. Продолжительное воздействие низких ЭРОА радона на персонал при высокой тяжести труда, воздействии производственных факторов: шума, вибрации, аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), запыленности, недостаточной освещенности – может приводит к повышению риска заболеваний. Радиоактивный газ может накап-

ливаться в значительных концентрациях в выработках, представляя опасность здоровью персонала. Длительное вдыхание радона и его дочерних продуктов приводит к облучению легочной ткани и многократно увеличивает риск развития онкологических заболеваний, что классифицируется Международным агентством по изучению рака (IARC) как канцероген первого класса опасности [16, 17]. В связи с этим становится актуальным мониторинг концентраций радона не только в действующих выработок, но и на ранних стадиях – до начала ведения горных работ на поверхности шахтного поля. Таким эффективным и экономичным методом предварительной оценки радиационной обстановки является поверхностная радоновая съемка, которая позволяет проводить исследования горно-геологических условий, не спускаясь в шахту, прогнозировать разломы, возможные очаги самовозгорания угля.

Радоновой съемке посвящены многие исследования [18, 19]. Ранее нами также были проанализированы результаты поверхностных радоновых съемок за период с 2014 по 2023 годы на территории Кузнецкого угольного бассейна. Радоновые съемки проводятся регулярно как профилактическое мероприятие с целью обеспечения безопасности персонала на территории угольного бассейна, эффективность которых подтверждают многие исследования [18, 19]. В статье представлены результаты замеров плотности потока радона (ППР) с поверхности шахтного поля и отбора объемной активности (ОА) радона в выработках двух шахт, проведенные летом 2025 г., проанализированы полученные значения с предыдущими за 2021/2022 года.

Методология. Целью настоящей статьи является обоснование важности и необходимости проведения поверхностных радоновых съемок в качестве неотъемлемого элемента системы обеспечения радиационной безопасности на угольных шахтах. В работе представлены результаты проведения замеров на поверхности и в шахтах Кузбасса, проведенных летом 2025 г.

Плотность потока радона является важным параметром для оценки радиационной опасности территории. ППР не является постоянной величиной и подвержена значительным временным колебаниям (суточным, сезонным), обусловленным изменениями метеорологических условий (атмосферное давление, температура, влажность) и геодинамических процессов.

Данное исследование сфокусировано на решении двух фундаментальных задач:

- изучение временной динамики ППР для выявления закономерностей и определения репрезентативных временных интервалов для измерений;
- сопоставление данных наземных измерений (ППР) с данными подземных измерений (объемная активность радона (ОА)), полученными непосредственно в горных выработках шахт.

Практическая значимость работы заключается в установлении количественной связи между ППР на поверхности и ОА радона в выработке, что позволит разработать более эффективную систему мониторинга и возможность прогнозировать радиационную обстановку подземных горных выработок с поверхности. Проведение регулярного мониторинга позволяет своевременно выявить геодинамическую активность, сопровождаемую изменением эманацій радона, и снизить риски профессиональных заболеваний горнорабочих.

Исследование включал в себя два этапа проведения работ. Первый этап исследований позволил провести анализ на двух шахтах Кузнецкого угольного бассейна, включал в себя проведение радоновых съемок на поверхности, использовались накопительные камеры типа НК-32.

В заранее определенных контрольных точках, расположенных над проекцией подземных горных выработок, устанавливались камеры НК-32. Ключевой особенностью методики является сорбция радона с различными временными интервалами, позволяющая наблюдать за динамикой ППР. Второй этап включал исследования в выработках: измерение объемной активности (ОА) радона. Замеры проводились непосредственно в подземных выработках шахт строго под теми же точками, что и ППР. Это обеспечивает прямую корреляцию между измерениями ППР на поверхности и ОА радона в выработках в шахтах, позволяет исключить влияние неоднородности геологического строения пласта.

Для углубленного анализа в качестве репрезентативного объекта был выбран пласт 50 шахты им. В.Д. Ялевского. Детальное описание его геологического строения необходимо для интерпретации данных по радону, так как свойства пород напрямую влияют на миграцию газа.

Пласт 50 характеризуется выдержанной мощностью в интервале 3,62-3,67 м, что указывает на его устойчивость по простиранию и позволяет исключить сильное влияние изменчивости мощности на результаты измерений. Пласт имеет простое строе-

ние, то есть содержит незначительное количество породных прослоев, что упрощает модель миграции газа.

Пласт относится к пологому падению с углами 1-2° (по падению) и 1-3° (по простиранию). Ложная кровля представлена углистым алевролитом от 0,13-0,16 м. Пласт 50 представляет собой породную прослойку – от алевролита мелкозернистого до 0,02 м и угольной до 0,05 м ближе к почве. Ложная почва представлена углистым алевролитом от 0,03 м до 0,21 м.

Аналогично проанализировано геологическое строение 66 пласта шахты «Талдинская-Западная 1». Пласт 66 характеризуется сложным строением, представленным углем с породными прослоями алевролита общей мощностью 1-5 м. Пласт является слабоустойчивым и склонным к пучению. Ложная кровля пласта выдержана и представлена среднеустойчивым углистым алевролитом мощностью 0,05-0,5 м. Непосредственная кровля сложена мелкозернистым алевролитом средней крепости мощностью 6,09-7,6 м, устойчивость которого варьируется от неустойчивой и легкообрушающейся до среднеустойчивой и слабообрушающейся. Основная кровля представлена толщей переслаивающихся алевролитов разной зернистости и мелкозернистых песчаников мощностью 4,6-20,8 м, также имеющих широкий диапазон устойчивости. Ложная почва пласта сложена среднеустойчивым углистым алевролитом мощностью 0,05-0,85 м. Непосредственная почва представлена мелкозернистым алевролитом мощностью 2,0-4,5 м, который склонен к пучению при размокании.

Строение пластов 50 и 66 с учетом горно-геологических условий создает благоприятную среду для миграции радона из угольного пласта и вмещающих пород.

Результаты. В августе 2025 года на территории шахты им. В.Д. Ялевского проведен комплексный полевой эксперимент, основной целью которого являлось исследование временной динамики плотности потока радона (ППР) с поверхности.

Для достижения поставленной цели была применена методика последовательного экспонирования накопительных камер НК-32. Были выбраны точки, на местах которых проводились замеры в 2021-2022 годах (рис. 2):

- кратковременная экспозиция (2, 4, 6 часов): позволяет оценить диапазон значений ППР за временные интервалы, выявить влияние таких факторов, как изменения температуры, влажности в течение суток.

- суточная экспозиция (24 часа): дает интегрированное, усредненное за сутки значение ППР, которое можно сравнивать с результатами долгосрочных измерений.

Такой дифференцированный подход позволяет не только получить усредненные данные, но и проанализировать динамику суточных значений ППР, что является важным для разработки репре-

зентативных методик измерений.

На момент проведения всех работ по измерению ППР с поверхности, метеословия характеризовались следующими параметрами: температура воздуха: от +15 °С до +26 °С, относительная влажность воздуха: от 60% до 72%. Важно отметить, что указанный диапазон температур и влажности полностью соответствует требованиям действующих нормативных документов по существующей методике отбора проб.

Полученные данные представлены на рисунках 1 и 2 в сравнении с данными, которые были получены до начала проведения работ на шахте в 2021 году.

Пробы для определения объемной активности (ОА) радона в воздухе отбирали по конвейерному и вентиляционному штрекам при температуре 18-22°С и влажности 75-78%, 5006 (отмечено треуголь-

никами на рис. 3). В таблице 1 представлены результаты отбора объемной активности (ОА) радона, полученные в шахте.

Анализ данных показал, что значения ЭРОА на шахте им. В.Д. Ялевского не превышают нормативных значений 310 Бк/м³ [20].

Далее представлены приведены данные по шахте «Талдинская-Западная 1» (рис. 4, 5). Радоновую съемку и отбор проб проводили в период в августе при тех же метеословиях.

Стоит отметить, что на шахте «Талдинская-Западная 1» замеры проводили с временным интервалом в 1 час (рис. 5).

Аналогично с шахтой им. В.Д. Ялевского, были проведены замеры в выработках АО радона в шахте «Талдинская-Западная 1», результаты которых представлены в таблице 2.

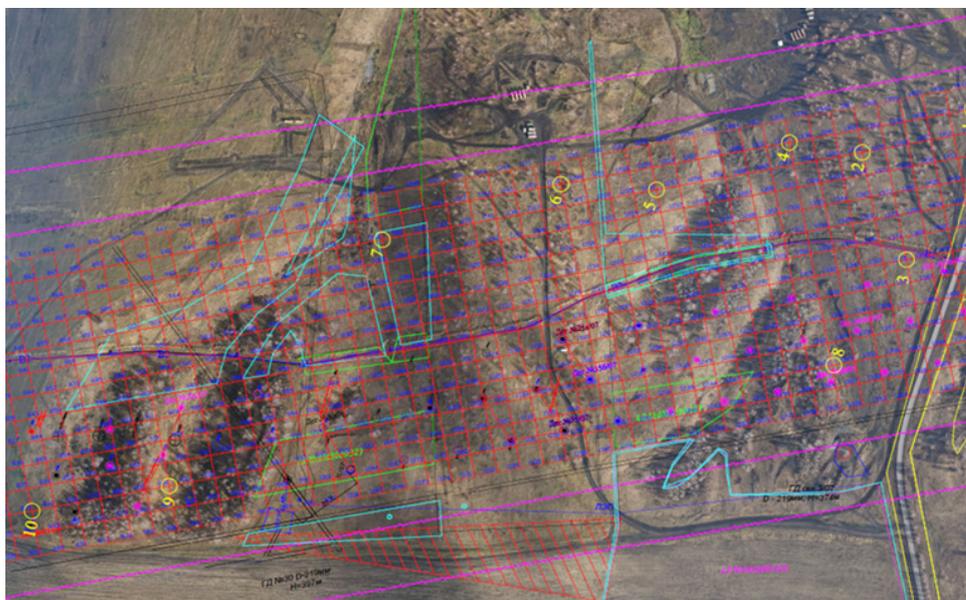


Рисунок 1 – Точки проведения радоновой съемки (по данным ВГСЧ)

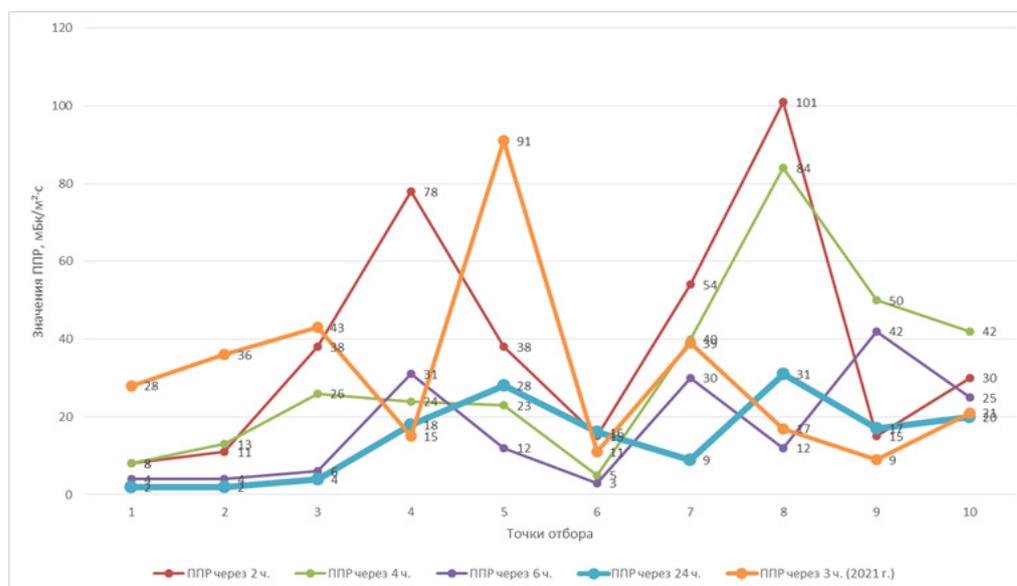


Рисунок 2 – Результаты измерений плотности потока радона

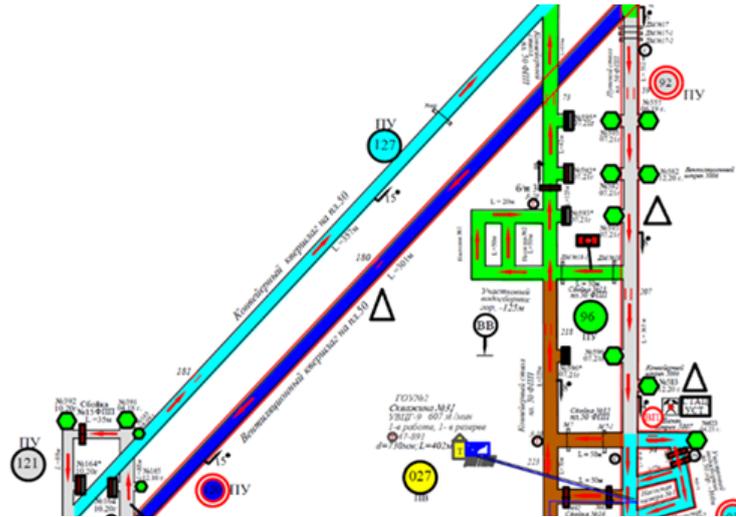


Рисунок 3 – Место отбора проб ОА на конвейерном штрэке 50 пласта (по данным ВГСЧ)

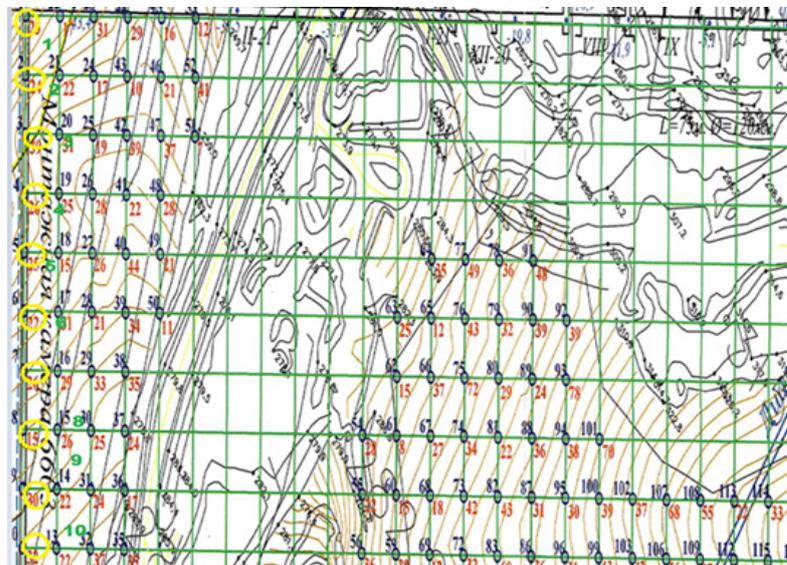


Рисунок 4 – Точки отбора проб (по данным ВГСЧ)

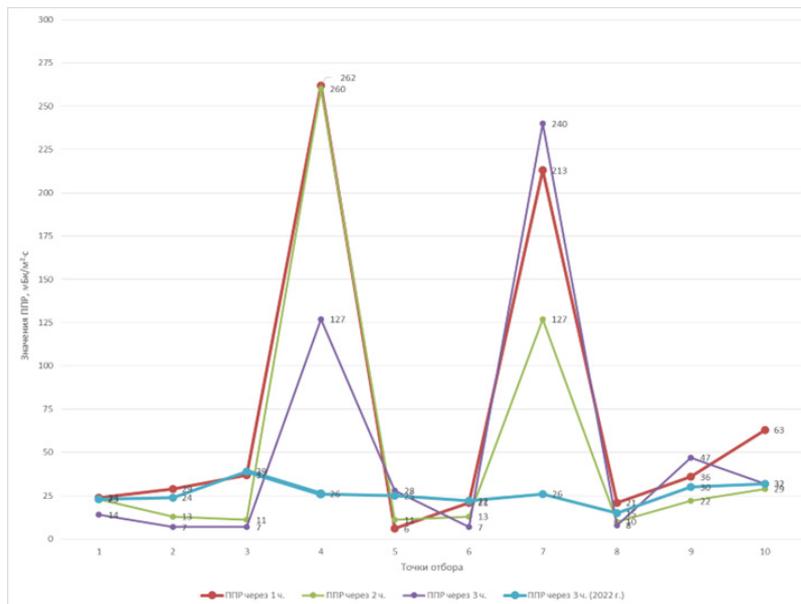


Рисунок 5 – Результаты измерений плотности потока радона

Таблица 1 – Значения АО на шахте им. В.Д. Ялевского

№ п/п	Объемная активность, Бк/м ³	ЭРОА, Бк/м ³
1	103,1 ± 37,0	51,6 ± 18,5
2	64,6 ± 31,0	32,3 ± 15,5
3	52,7 ± 29,2	26,4 ± 14,6
4	40,9 ± 27,3	20,5 ± 13,7
5	38,3 ± 26,9	19,2 ± 13,5

Таблица 2 – Значения объемной активности радона в воздухе шахты «Талдинская-Западная 1»

№ п/п	Объемная активность, Бк/м ³	ЭРОА, Бк/м ³
1	137,9 ± 37,0	69,0 ± 18,5
2	306,2 ± 63,5	153,1 ± 31,8
3	278,5 ± 59,2	139,3 ± 29,6
4	35,7 ± 18,9	17,9 ± 9,5

Обсуждение. Основной задачей работы был анализ динамики плотности потока радона (ППР) для совершенствования системы мониторинга с целью своевременного применения превентивных мероприятий при обнаружении пиковых значений для защиты персонала. Проведенные на шахтах измерения позволили выявить зависимость ППР с поверхности шахтного поля и ОА радона в выработках.

Радиационный мониторинг бы дифференцирован с целью получения наиболее репрезентативных данных о динамике ППР: шахте им. В.Д. Ялевского измерения проводились с интервалом в 2 часа, выполнялись интегральные замеры с экспозицией 24 часа, на шахте «Талдинская-Западная 1» – измерения проводились каждый час. Обоснование различной периодичности измерений объясняется следующим: выявление краткосрочной динамики (шахта «Талдинская-Западная 1» – замер каждый час) позволяет фиксировать максимально быстро движение радона. Определение усредненных и интегральных характеристик (шахта им. В.Д. Ялевского – замеры каждые 2 и 24 часа) позволяет получить достаточно детализированную картину суточной динамики ППР, этот режим позволяет выявить основные тренды в изменении ППР в течение суток. Проведение измерений с разной периодичностью на двух шахтах позволяет провести анализ значения ППР от времени замеров.

По шахте им. В.Д. Ялевского анализ данных показал, что значения ППР в 2025 году по всем временным интервалам точек замеров превышает фоновые показатели 2021 года. График ППР с поверхности за 24 часа является наиболее сглаженным и, вероятно, наиболее репрезентативным. На графиках за 2, 4 и 6 часов прослеживается схожая динамика. Кратковременные измерения (2-6 часов) позволяют установить пиковые значения оперативной оценки трендов и выявления горногеологических нарушений (разломы, очаги пожаров).

Полученные значения объемной активности (ОА) радона в выработках коррелируют с результатами плотности потока радона (ППР) на поверхности.

Анализ представленных данных по плотности потока радона (ППР) с поверхности шахты «Тал-

динская-Западная 1» показал рост значений ППР относительно с данными за 2022 год. Фоновые значения ППР, полученные в 2022 года не превышали 50 мБк/м²·с, находясь в основном в диапазоне 10-40 мБк/м²·с. В 2025 году значения ППР при кратковременных измерениях (1, 2, 3 часа) достигли 260 Бк/м²·с, наблюдается рост значений в 5÷20 раз. Графики за 1, 2 и 3 часа имеют схожую форму, но отличаются абсолютными значениями. Наиболее высокая детализация у графика ППР через 1 час – он показывает максимальные пики и самую высокую изменчивость. График ППР через 3 часа является более сглаженным, так как усредняет кратковременные всплески. Кратковременные (1-3 часа) измерения эффективно фиксируют ППР, но могут давать завышенные значения относительно среднесуточной нормы. Полученные данные объясняют высокие концентрации радона в воздухе шахты. Наземные измерения ППР четко коррелируют с объемной активностью (ОА) радона в выработках шахты.

В связи с ростом значений в 2025 г. относительно 2021/2022 годами актуален регулярный радиационный контроль с поверхности шахты с целью прогнозирования рисков для горнорабочих и принятия превентивных мероприятий для их защиты. Полученные данные доказывают, что значения плотности потока (ППР) с поверхности шахтного поля, являются высокочувствительным индикатором изменений геологической среды, вызванных горными работами.

Выводы. На основании комплексного анализа данных, полученных на шахтах им. В.Д. Ялевского и «Талдинская-Западная 1», можно сформулировать следующие ключевые выводы: выявлена корреляция между плотностью потока радона (ППР) с поверхности шахты и объемной активностью (ОА) радона в выработке шахт; установлен рост значений плотности потока радона (ППР) на обеих шахтах за период с 2021-2022 по 2025 год. Так, на шахте им. В.Д. Ялевского значения ППР возросли в 5-10 раз. На шахте «Талдинская-Западная 1» зафиксирован рост ППР – до 20 раз по сравнению с фоновыми значениями 2022 года, с достижением максимальных значений 260-262 Бк/м²·с. Важно отметить, что значения ЭРОА на обеих шахтах

не превышают нормативных значений. Подтверждена эффективность дифференцированной методики измерений ППР с различной временной дискретизацией. Кратковременные замеры (1-3 часа) успешно фиксируют пики значений и высокочастотную динамику потока, что важно для оперативного предупреждения для применения превентивных мероприятий. Усредненные замеры (24 часа) обеспечивают получение репрезентативных данных для количественной оценки радоноопасности и долгосрочного прогноза. Для своевременного реагирования на горногеологические изменения рекомендуется применять регулярный радиационный мониторинг для контроля условий рабочих и обеспечения безопасных условий труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. № 3. С. 18-29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору: ежегодные отчеты о деятельности [Электронный ресурс]. URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 18.09.2025).
3. Gopinathan P., Subramani T., Barbosa S., Yuvaraj D. Environmental impact and health risk assessment due to coal mining and utilization // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. № 10. P. 6915–6922. DOI: 10.1007/s10653-023-01744-z.
4. Deng X., Zhang Y., Cui L. Occupational health and occupational hazard control in coal mines: a comparative study // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 446. № 5. P. 052109. DOI: 10.1088/1755-1315/446/5/052109.
5. Thebo A.A., Siddiqui M.I., Arisar K.N. et al. Occupational Health and Safety Practices Among Coal Mine Workers in Pakistan: Health and Safety Practices in Coal Mines Workers // Pakistan Journal of Health Sciences. 2024. Vol. 5. № 7. DOI: 10.54393/pjhs.v5i07.1636.
6. Shojaee Barjoe S., Rodionov V., Rezaei N. Occupational injuries associated with safety climate among ceramic industry workers in Iran // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. № 24585. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09704-6>.
7. Шаммазов И.А. Особенности влияния сложных горных условий на строительство и эксплуатацию самотечных участков трубопроводного транспорта / И.А. Шаммазов, А.В. Борисов, Б.С. Александрук [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 7. С. 39-43. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-7-39-43.
8. Гендлер С.Г., Серёгин А.С., Белехов П.А. Исследование влияния эксплуатационно-конструкционных характеристик дизельной техники на загазованность подземных горных выработок // Горная промышленность. 2025. № 4. С. 170-177. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-170-177.
9. Жерльгина Е.С., Куранова М.Е., Гусев В.Н., Одинцов Е.Е. Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород // Горная промышленность. 2025. № 1. С. 162-169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>.
10. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Романевич К.В. Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа природных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 65-72. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-65-72>.
11. Афанасьев П.И., Белов А.А. Оценка сейсмозрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам взрыва // Горная промышленность. 2025. № 3. С. 138-145. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-3-138-145>.
12. Ajrouche R., Billon S., Le Pointe H.D. et al. Quantitative health risk assessment of indoor radon: a systematic review // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 177. № 1-2. P. 69-77. DOI: 10.1093/tpd/ncx152.
13. Yang L., Bihane G.E., Zhu J., Geng J. Mining employee's safety and the application of information technology in coal mining // Frontiers in Public Health. 2021. Vol. 9. Art. 709987. DOI: 10.3389/fpubh.2021.709987.
14. Gür F., Yaprak G. An evaluation of the radiological hazards from the coal-fired power plants in Turkey: From mining to ash disposal // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 267. Art. 122062. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122062.
15. Guo Y., Yang F. Mining Safety Research in China: Understanding Safety Research Trends and Future Demands for Sustainable Mining Industry // SSRN. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4181446.
16. Turner M.C., Krewski D., Chen Y., Pope C.A., Gapstur S.M., Thun M.J. Radon and lung cancer in the American Cancer Society cohort // Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention. 2020. Vol. 29. № 3. P. 528-536. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-19-1166.
17. Coleman N.C., Burnett R.T., Higbee J.D. et al. Cancer mortality risk, fine particulate air pollution, and smoking in a large, representative cohort of US adults // Cancer Causes & Control. 2020. Vol. 31. P. 767-776. DOI: 10.1007/s10552-020-01317-w.
18. Портола В.А., Тайлаков О.В., Ли Хи Ун и др. Обнаружение, локация и оценка состояния очагов подземных пожаров по аномалиям радона на земной поверхности // Уголь. 2021. № 5. С. 47-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-5-47-52.
19. Qin Y., Song Y., Lu X., Jia X. A comprehensive method to prevent top-coal spontaneous combustion utilizing dry ice as a fire extinguishing medium: Test apparatus development and field application // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 29. № 13. P. 19741-19751. DOI: 10.1007/s11356-021-17213-y.
20. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 07.07.2009.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 331.453

EDN: VIIZDZ

ПРЕДСМЕННАЯ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА РАБОТНИКОВ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7916-2261

AuthorID: 813119

ORCID: 0000-0001-9305-3061

ResearcherID: KFR-7322-2024

ScopusID: 57226552043

ЗАХАРОВА Елена Анатольевна, кандидат биологических наук,
доцент кафедры техносферной безопасности

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
(127434, Россия, Москва, улица Тимирязевская, 49, e-mail: e.zaharova@rgaumcxa.ru)

БУРЦЕВА Мария Юрьевна, студент

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
(127434, Россия, Москва, улица Тимирязевская, 49, e-mail: maria.burtse@yandex.ru)

SPIN: 3565-3539

AuthorID: 521004

ORCID: 0000-0001-9349-6874

ResearcherID: AAE-2547-2019

ScopusID: 57194042949

МУРКО Елена Викторовна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
(125167, Россия, Москва, проспект Ленинградский, 49/2, e-mail: elena6455@mail.ru)

Аннотация. Проведены исследования по разработке и внедрению дифференцированных подходов к предсменной психофизиологической диагностике для работников, чья деятельность осуществляется на опасных производственных объектах. Цель исследования – обоснование необходимости и разработка подходов к организации мониторинга психофизиологического состояния работников ОПО. Для оценки психофизиологического состояния работников ОПО рекомендуется применять комбинированный подход, который включает в себя такие этапы как, доврачебные обследования, психологические опросники и экспресс-тесты, и оценка операторской работоспособности. Предлагается адаптация существующих нормативных положений с учётом особенностей профессиональной среды, а также разработка стандартов, регламентирующих обязательность обследований для категорий работников с высоким уровнем профессионального риска. В ходе работы сформулированы практические рекомендации по внедрению системы предсменной психофизиологической диагностики, а также предложена модель интеграции в систему управления охраной труда предприятия, направленная на снижение влияния человеческого фактора, предупреждение производственного травматизма и повышение профессиональной надёжности персонала.

Ключевые слова: психофизиологическое состояние, предсменная диагностика, человеческий фактор, производственный травматизм, безопасность труда, опасные производственные объекты, мониторинг.

MONITORING OF PSYCHOPHYSIOLOGICAL ADAPTATION OF WORKERS AT DANGEROUS PRODUCTION FACILITIES

© The Author(s) 2025

ZAKHAROVA Elena Anatolyevna, candidate of biological sciences,
associate professor of the department of Technosphere Safety

Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
(127434, Russia, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, e-mail: e.zaharova@rgaumcxa.ru)

BURTSEVA Maria Yurievna, student

Russian State Agrarian University – Moscow State Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
(127434, Russia, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, e-mail: maria.burtse@yandex.ru)

MURKO Elena Viktorovna, candidate of technical sciences, fssociate professor,
associate professor of the department of Life safety

Financial University under the Government of the Russian Federation
(125167, Russia, Leningradsky Avenue, 49/2, Moscow, e-mail: elena6455@mail.ru)

Abstract. Research has been conducted on the development and implementation of differentiated approaches to pre-shift psychophysiological diagnostics for workers whose activities are carried out in hazardous production

facilities. The aim of the study is to substantiate the necessity and develop approaches to organizing the monitoring of the psychophysiological condition of workers at hazardous production facilities (HPF). A combined approach is recommended for assessing the psychophysiological state of HPF workers, which includes stages such as pre-medical examinations, psychological questionnaires, express tests, and the assessment of operator performance. It is proposed to adapt existing regulatory provisions to account for the specifics of the professional environment, as well as to develop standards regulating the obligation of examinations for categories of workers with a high level of professional risk. During the work, practical recommendations were formulated for the implementation of a pre-shift psychophysiological diagnostics system, as well as a model of integration into the occupational safety management system of the enterprise aimed at reducing the impact of the human factor, preventing occupational injuries, and increasing the professional reliability of the staff.

Key words: psychophysiological condition, pre-shift diagnostics, human factor, occupational injuries, occupational safety, hazardous production facilities, monitoring.

Для цитирования: Захарова Е.А. Предсменная психофизиологическая диагностика работников опасных производственных объектов / Е.А. Захарова, М.Ю. Бурцева, Е.В. Мурко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 184-192. – EDN: VIIZDZ.

Введение. Высокие темпы развития промышленного производства ведут к возрастанию сложности выполняемых задач, стоящих перед работниками, и психофизических нагрузок, особенно в условиях двухсменного графика, воздействия вредных и опасных производственных факторов, а также высокой ответственности за работу на опасных производственных объектах (ОПО). Работники подвержены значительным рискам, связанным с ухудшением их психофизиологического состояния. Своевременное выявление признаков переутомления, снижения концентрации внимания, повышенного стресса и других критически важных состояний позволяет существенно повысить уровень производственной безопасности и снизить вероятность несчастных случаев на опасных производственных объектах (рис. 1).

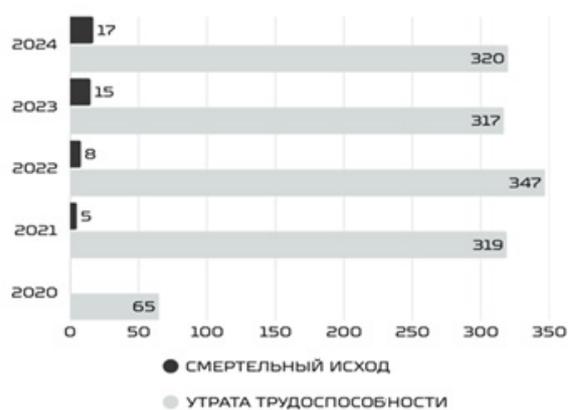


Рисунок 1 – Годовая динамика частоты несчастных случаев в отраслях обрабатывающей промышленности за период 2020-2024 гг.

Человеческий фактор играет ключевую роль в обеспечении безопасности на рабочем месте, и особенно значимы психофизиологические характеристики работников. Современные трактовки термина «человеческий фактор» в работах различных авторов отражают смену парадигмы в охране труда и в безопасности производства в целом [1]. Сравнительная аналитика представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Понятие «человеческий фактор» *

Автор	Сущностное понимание
Шадрин Ю.И., Фомин А.И.	Термин «человеческий фактор» (от амер. human factors engineering – инженерия человеческих факторов) в широком смысле слова применяется при описании специфики многовидового взаимодействия человека и техники в больших системах
Королёва М.В., Косякин В.С.	Человеческий фактор – это возможность принятия человеком ошибочных или нелогичных решений (действий) в конкретной ситуации

*составлена авторами

Человеческий фактор, как совокупность психофизиологических, когнитивных и поведенческих характеристик работника, является одной из ключевых переменных, определяющих уровень производственного травматизма, особенно на предприятиях, где эксплуатируются объекты, относящиеся к категории опасных производственных объектов (ОПО). В условиях металлургического или любого другого обрабатывающего производства, отличающихся высокой технической насыщенностью, непрерывностью процессов и строгим регламентом операций, значение человеческого фактора возрастает многократно.

Опасные работы, выполняемые на ОПО, напрямую связаны с напряжённостью и с тяжестью трудового процесса, которые оказывают комплексное влияние на уровень промышленной безопасности. К числу таких работ на ОПО относятся [2]:

- эксплуатация и ТО оборудования под давлением;
- работу с расплавами чёрных и цветных металлов;
- обращение с токсичными, взрывоопасными и легко воспламеняющимися веществами;
- монтаж, демонтаж и управление ГПМ;
- проведение подземных, высотных и других видов горных работ.

Цель исследования – обоснование необходимости и разработка подходов к организации мони-

торинга психофизиологического состояния работников ОПО. Объектом настоящего исследования является деятельность работников ООО «Хавейл Мотор Мануфэкчуринг Рус» на ОПО, с оценкой их психофизиологического состояния, а также его влияние на безопасность труда. Актуальность психофизиологического мониторинга подтверждается статистическими данными: по состоянию на конец 2024 года, около 22% работников обрабатывающих производств заняты в условиях тяжёлого труда, а примерно 2,1% – в условиях напряжённого трудового процесса. По уровню тяжести условий труда автомобилестроение занимает третье место среди всех видов экономической деятельности, а по уровню напряжённости – пятое место [3].

В Трудовом кодексе РФ отсутствует определение термина «предсменный медицинский осмотр», так же, как и «послесменный медицинский осмотр». Тем не менее, в части 3 ст. 220 ТК РФ [4] уточнено, что для определенных категорий работников могут быть установлены обязательные медицинские обследования, проводимые перед началом их трудовой деятельности (в начале рабочего дня) и по завершении рабочего времени.

Проведение предсменных и/или послесменных медицинских осмотров осуществляется в соответствии с Приказом Министерства здравоохранения № 266Н от 30 мая 2023 года. Предсменные, предрейсовые, послесменные и послерейсовые медицинские осмотры осуществляются с применением медицинских устройств для мониторинга состояния здоровья работников. Данные осмотры направлены на выявление признаков воздействия вредных и опасных производственных факторов, а также на определение наличия алкогольного, наркотического или токсического опьянения и остаточных явлений.

Ключевые положения Приказа № 266Н [5]:

- медицинские осмотры могут проводиться с использованием автоматизированных устройств контроля (алкотестеры, тонометры, пульсометры и пр.);
- оформление результатов проводится в электронном или бумажном виде;
- осмотр осуществляется в специально оборудованных медицинских пунктах на территории организации или с выездом специалистов.

Данный приказ распространяется, в первую очередь, на водителей транспортных средств, однако допускает возможность применения аналогичной процедуры и для других категорий работников, если такая обязанность предусмотрена внутренними нормативными актами работодателя, коллективными договорами или отраслевыми регламентами. Ограниченный подход к категории обследуемых работников вызывает обоснованные сомнения с точки зрения обеспечения безопасности на ОПО. Работники, занятые на таких объектах, подвергаются не менее высоким, а зачастую и более выраженным психофизиологическим нагрузкам, связанным с высоким уровнем ответственности, необходимостью

принятия решений в условиях риска, взаимодействием с опасными веществами и технически сложным оборудованием. Это требует более широкого нормативного охвата категорий работников, допуск к труду которых должен сопровождаться объективной оценкой их психофизиологического состояния.

В текущей редакции законодательства не учитывается разнообразие профессиональных рисков, присущих различным сферам промышленного производства. Кроме того, в условиях постоянного технологического обновления и интенсификации труда возрастает потребность в динамическом контроле состояния работников с целью профилактики утомления, эмоционального выгорания, когнитивных сбоев и иных состояний, препятствующих безопасной и эффективной профессиональной деятельности [6-9].

Психофизиологическая диагностика представляет собой совокупность методов, направленных на выявление и оценку функционального состояния работника с целью определения его готовности к выполнению трудовых обязанностей в условиях профессиональной нагрузки. В таблице 2 приведён сравнительный анализ наиболее распространённых методов, применяемых в практике оценки психофизиологических параметров.

Методология. ООО «Хавейл Мотор Мануфэкчуринг Рус» – высокотехнологичное предприятие, включающее в свою производственную структуру объекты, отнесённые к категории ОПО в соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ. Деятельность сотрудников данных подразделений сопряжена с воздействием вредных и опасных факторов, требующих повышенного уровня профессиональной ответственности, строгого соблюдения технологических регламентов, а также постоянной готовности к действиям в условиях потенциальных аварийных ситуаций. Структура ОПО на предприятии включает цеха и производственные площадки, где эксплуатируются грузоподъемные механизмы (ПС), сосуды, работающие под давлением, а также объекты газопотребления. Рабочие места, функционирующие в данных условиях, подвержены как физическим, так и психоэмоциональным нагрузкам, отражающимся на напряженности трудового процесса.

В исследовании по разработке и внедрению предсменной психофизиологической диагностики участвовали две категории респондентов: группа А – рабочие и технический персонал, непосредственно занятые на производстве ($N=14$) и группа Б – руководители и инженерно-технические работники, ответственные за организацию производственного процесса и контроль за безопасностью труда ($N=6$). Общее количество участников составило 20 человек. Все респонденты были ознакомлены с условиями прохождения обследования, дали информированное согласие на участие и прошли тестирование в индивидуальном порядке. Мониторинг проводился в течение 30-ти дней.

Таблица 2 – Методы психофизиологической диагностики*

Метод обследования	Основные показатели	Преимущества	Недостатки
Сбор анамнестических данных, изучение документов и профиля работника	Пол, возраст, образование, профессиональный опыт, история заболеваний, наличие сертификатов, рекомендации	Комплексное представление о профессиональном и медицинском статусе работника	Субъективность информации, зависимость от достоверности предоставленных сведений, высокая временная затратность
Метод анализа антропометрических данных	Рост, вес, ИМТ, физическая подготовленность	Объективная оценка физического состояния и соответствия профессии	Не учитывает психоэмоциональные параметры, не отражает адаптивные возможности
Метод доврачебного обследования	Артериальное давление, пульс, состояние органов и систем, психоэмоциональный фон	Выявление соматических противопоказаний, общая картина здоровья	Ограниченная точность в диагностике психофизиологических нарушений, необходимость ресурсов
Индивидуальная беседа	Мотивация, личностные особенности, коммуникативные и адаптационные способности	Глубокое понимание психологических факторов, формирование доверия	Субъективность, влияние предвзятости интервьюера
Психофизиологическое наблюдение	Концентрация, реакция на стресс, утомляемость	Реальное поведенческое отражение психофизиологического состояния	Требует подготовленного специалиста, высокая трудоёмкость
Экспресс-оценка функциональных резервов	Уровень психической и физической устойчивости, когнитивные функции	Быстрота применения, простота, оперативность	Поверхностность оценки, ограниченность по глубине анализа
Нейрофункциональная диагностика	Работа зрительных, слуховых, тактильных анализаторов	Объективность, возможность раннего выявления нарушений	Необходимость в оборудовании, высокая стоимость и профессиональные требования к расшифровке
Полиграфическое тестирование	Эмоциональное напряжение, стрессоустойчивость, честность, физиологические реакции	Высокая чувствительность к эмоциональным реакциям	Этические споры, сомнения в надёжности, возможность ложно положительных реакций
Автоматизированная диагностика групповой совместимости	Взаимодействие в коллективе, коммуникации, конфликты	Объективная оценка командной динамики, выявление скрытых проблем	Не охватывает индивидуальных черт личности, зависимость от алгоритмов программ
Оценка операторской работоспособности	Внимание, скорость и точность действий, уровень стресса при выполнении задач	Моделирование реальной профессиональной деятельности, выявление ошибок	Моделируемые условия могут искажать результат, требует длительной подготовки и тестирования

*составлена авторами

Обследование проводилось в медицинском пункте предприятия, расположенном на территории основного производственного комплекса. Помещение оборудовано средствами для проведения как автоматизированного доврачебного контроля, так и психофизиологического тестирования. Для обеспечения конфиденциальности и отсутствия постороннего влияния во время тестов, каждый испытуемый проходил обследование индивидуально, в специально выделенной диагностической зоне.

Всего в обследовании было выделено четыре ключевых этапа.

1. Оценка общего уровня адаптационных и личностных характеристик. Цель этапа – определить личностную предрасположенность к риску и уровень стрессоустойчивости, что важно для оценки исходных адаптационных ресурсов каждого работника. Респонденты прошли следующие опросник нервно-психической устойчивости (В.Ю. Рыбников, методика «Прогноз») и опросник оценки склонности к риску (автор Г. Шуберт, адаптация М.А. Котик) [10,11].

2. Доврачебное (предсменное) обследование. Цель

этапа – оперативно выявлять острые отклонения в состоянии здоровья, препятствующие безопасному выполнению трудовых функций, и предотвращать допуск к работе лиц, находящихся в состоянии утомления, функционального перенапряжения или интоксикации. На рисунке 2 приведены основные методы доврачебного контроля, рекомендуемые к применению в производственной среде [12].

Предсменное доврачебное освидетельствование осуществлялось с применением автоматизированного комплекса *NOBILIS* (рис. 3).

3. Психофизиологическое тестирование с использованием методики САН (самооценка самочувствия, активности и настроения) – экспресс-оценка текущего эмоционального состояния, позволяющая выявить признаки утомления, сниженной мотивации или, наоборот, высокую готовность к выполнению производственных задач, и теста на психомоторную реакцию (реакция на подвижный объект, простая и сложная реакции выбора) – оценка скорости реагирования, устойчивости внимания, моторной координации [13, 14].



Рисунок 2 – Доврачебное (предсменное) обследование



Рисунок 3 – Оборудование для доврачебного контроля (НОВИЛИС)

4. Обработка и оценка результатов – анализ данных, полученных на всех предыдущих этапах. Результаты группировались по категориям работников (группы А и Б) и индивидуальным особенностям реагирования.

Для оценки психоэмоционального состояния использовались мобильные устройства (планшеты или смартфоны), что позволило обеспечить автономность, удобство и оперативность сбора данных вне зависимости от стационарного оборудования. Каждый испытуемый проходил тесты индивидуально, в специально отведённой зоне медицинского пункта. Результаты тестирования фиксировались с помощью электронной формы на платформе *Google Forms*, адаптированной под каждую из применяемых методик. Использование цифрового формата позволило исключить влияние человеческого фактора при подсчёте баллов, обеспечить высокую точность интерпретации и оперативный доступ к результатам мониторинга.

Результаты. Для оценки способности работников сохранять эмоциональную стабильность в условиях стресса и повышенной производственной ответственности был применён опросник нервно-психической устойчивости (НПУ) и опросник оценки склонности к риску. По результатам опросника нервно-психической устойчивости, у работников (группа А) средний балл по шкале НПУ составил 38,6, что указывает на умеренный уровень устойчивости с тенденцией к понижению. Средний показатель по шкале искренности составил 3,9, что свидетельствует о достоверности предоставленных ответов.

У руководителей (группа Б) зафиксирован средний балл по шкале НПУ – 44,0, что соответствует

устойчивому среднему уровню нервно-психической устойчивости. Показатель искренности составил 4,2, что также подтверждает приемлемую достоверность данных. По результатам опросника оценки склонности к риску, средний балл в группе рабочих (группа А) составил 111,6, что соответствует среднему уровню склонности к рисковому поведению. Это свидетельствует о том, что работники, как правило, проявляют умеренную осторожность при принятии решений и в большинстве случаев склонны действовать в рамках инструкций и регламентов

У руководителей (группа Б) средний балл составил 129,7, что указывает на повышенный уровень склонности к риску. Данный результат отражает готовность к принятию решений в условиях неопределённости и повышенной ответственности, что характерно для управленческого персонала, но в условиях опасного производства требует сбалансированного подхода к оценке рисков и последствий.

По результатам предсменного медицинского осмотра, проведённого в первый день, у работников обеих групп (А и Б) не было выявлено отклонений, способных повлиять на безопасность труда. Анализ усреднённых данных по результатам ежедневных осмотров показал, что физиологическое состояние сотрудников обеих групп на протяжении 30 дней оставалось стабильным и удовлетворительным (рис. 4).

Результаты мониторинга психоэмоционального состояния персонала в условиях производственной среды с использованием опросника САН, свидетельствуют о появлении признаков снижения функционального состояния у ряда респондентов как среди работников (группа А), так и среди руководителей (группа Б).

У группы А отклонения от условной нормы (значения ниже 4,5 баллов по шкалам самочувствия, активности и настроения) были зафиксированы у 5 респондентов. Результаты показали пониженные значения как минимум по двум шкалам, что может указывать на усталость, эмоциональное напряжение или снижение психофизиологического тонуса. Особенно выраженные снижения были отмечены у 2-х респондентов, где баллы по активности и настроению опустились до 3 и 4, что может быть признаком стрессового состояния или переутомления.

В группе Б отклонения зарегистрированы только у 2-х респондентов. Показатели активности в 3 балла у респондента, может свидетельствовать о резком снижении работоспособности. Поскольку группа Б включает управленческий состав, даже кратковременное снижение показателей требует внимания, так как оно может повлиять на качество и безопасность принимаемых решений.

По итогам мониторинга за 30 дней, у работников отмечается стабильный средний уровень функционального состояния, однако в середине наблюдаемого периода (13-15 день) были зафиксированы небольшие снижения по всем трем шкалам, что может свидетельствовать о накопившейся утомляемости или кратковременном снижении мотивации. Ближе к концу периода наблюдается постепенное восстановление показателей, что говорит о компенсационных ресурсах организма и адаптации к рабочим условиям.

У руководителей показатели были стабильно выше, что свидетельствует о высоком уровне работоспособности и положительном эмоциональном фоне. Это может быть связано с профессиональной мотивацией, большей автономией в работе и навыками саморегуляции. Незначительное снижение показателей также наблюдалось в середине периода, но они оставались в пределах нормативных значений (рис. 5).

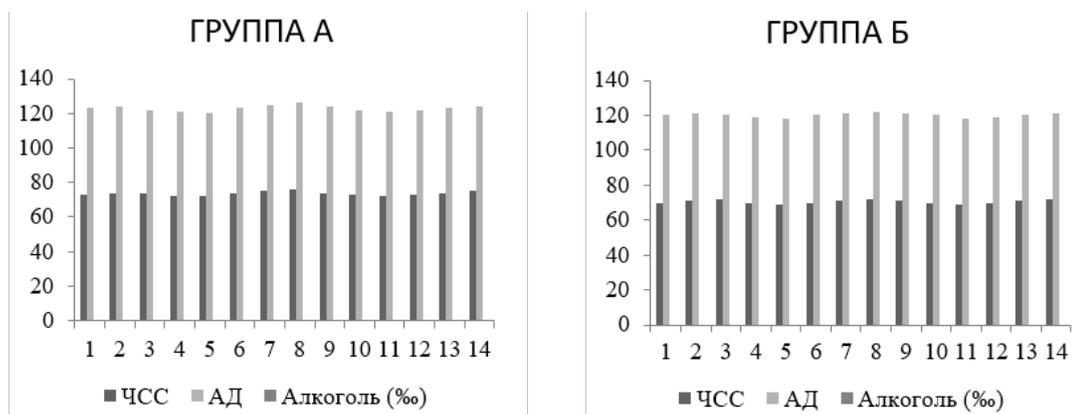


Рисунок 4 – Средние значения физиологических показателей МО по двум группам [составлено авторами]

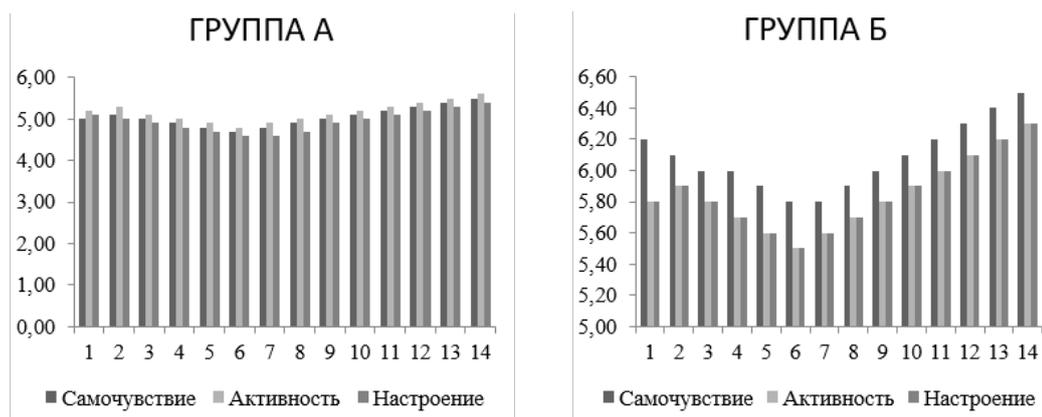


Рисунок 5 – Результаты тестирования двух групп по методике САН [составлено авторами]

В ходе 30-ти дневного мониторинга психомоторной реакции было проведено сравнение показателей между работниками (группа А) и руководителями (группа Б) по четырём ключевым параметрам: время простой реакции, количество ошибок в реакции выбора, точность попаданий на подвижный объект и общее время прохождения теста. Оценка психомоторных реакций зафиксиро-

вала отклонения от нормы по всем контрольным показателям у части респондентов.

Так, время простой реакции у 6 респондентов превышало порог 350 мс (максимум – 370 мс), что может свидетельствовать о снижении скорости сенсорных процессов, возможно, из-за усталости или недостаточной концентрации. Ошибки в реакции выбора: у 4-х респондентов зафиксировано

3-4 ошибки, что выходит за пределы допустимого значения (не более 2). Это указывает на временные затруднения с выбором правильных реакций в условиях многозадачности. Точность на подвижный объект: у 5 работников наблюдалась сниженная точность (<88%), что может свидетельствовать о снижении зрительно-моторной координации и скорости адаптации. Общее время прохождения теста: у ряда респондентов оно превысило 65 секунд, что может быть связано с повышенной утомляемостью или пониженной работоспособностью.

Результаты руководителей оказались стабильно в пределах нормы. Время простой реакции в среднем составило около 312 мс, что свидетельствует о высокой готовности к действию. Ошибки в реакции выбора отсутствовали либо были минимальными (от 0 до 1), что указывает на устойчивую концентрацию внимания. Точность попаданий на подвижный объект варьировалась от 91% до 95%, отражая отличную координацию движений и уровень зрительно-

моторного контроля. Общее время прохождения теста составило от 57 до 60 секунд, что говорит об оптимальном уровне психомоторной регуляции и сбалансированной скорости выполнения заданий.

Наблюдается устойчивая разница между двумя группами. Руководители продемонстрировали более быстрое время реакции – от 312 мс до 304 мс в течение периода, что свидетельствует о высокой готовности к действиям. У работников время реакции начиналось с 347 мс и постепенно снижалось до 322 мс, показывая положительную динамику, но оставаясь выше значений группы Б на всём протяжении наблюдения.

Обсуждение. Все проанализированные показатели психомоторной реакции указывают на высший уровень функциональной готовности у руководителей (группа Б) по сравнению с работниками (группа А), что может быть связано с особенностями профессиональной деятельности, более высокой степенью самоконтроля и навыками принятия решений в условиях ограниченного времени (рис. 6).

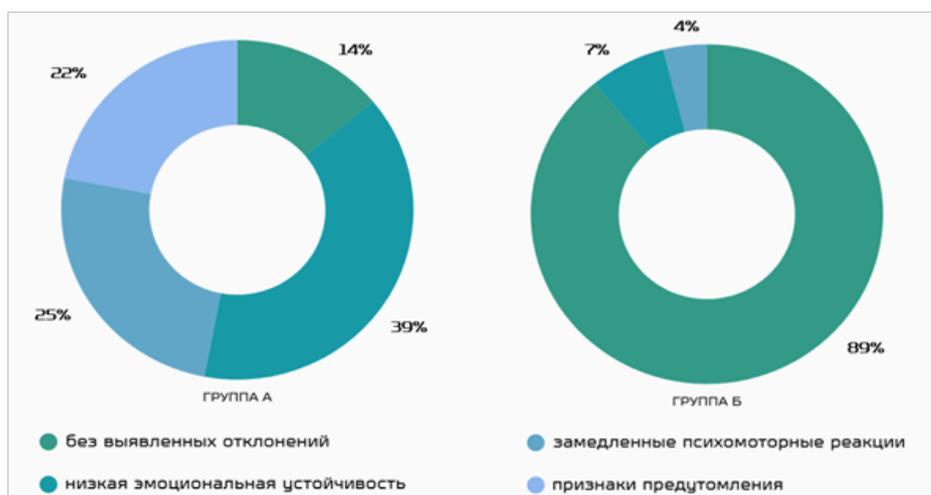


Рисунок 6 – Общее психофизиологическое состояние респондентов

Общее психофизиологическое состояние обеих исследуемых групп (работников и руководителей) оценивается как удовлетворительное. При этом группа Б (руководители) на протяжении всего периода демонстрировала более стабильные, высокие и соответствующие нормативным значениям результаты по большинству показателей – нервно-психическая устойчивость, склонность к риску, психомоторные реакции и показатели по опроснику САН. В частности, 86% руководителей показали высокий уровень устойчивости к стрессу и адекватное восприятие собственной активности и самочувствия. Это свидетельствует о высокой функциональной готовности и способности к эффективной деятельности в условиях повышенной ответственности и напряжённости.

В группе А (работников) наблюдались колебания по ряду параметров, особенно в середине наблюдаемого периода, что может быть связано с утомлением, сложной адаптацией к сменному гра-

фику или другими производственными нагрузками. У 39% работников выявлен пониженный уровень эмоциональной устойчивости, у 25% – замедление реакций, а более 22% продемонстрировали признаки предутомления уже до начала смены. Несмотря на положительную динамику по ряду показателей к концу периода, эти временные снижения требуют внимания.

Дополнительно была установлена устойчивая связь между тяжестью трудового процесса (класс 3.2 по данным СОУТ) и результатами тестирования. У работников, выполняющих тяжёлую физическую работу, чаще фиксировались снижение точности операторских реакций, увеличение времени ответа на стимулы (в среднем на 15-20% по сравнению с группой Б), а также признаки психофизиологического утомления до начала смены. Эти показатели указывают на истощение функциональных ресурсов и повышенный риск ошибок при выполнении производственных задач (рис. 7).

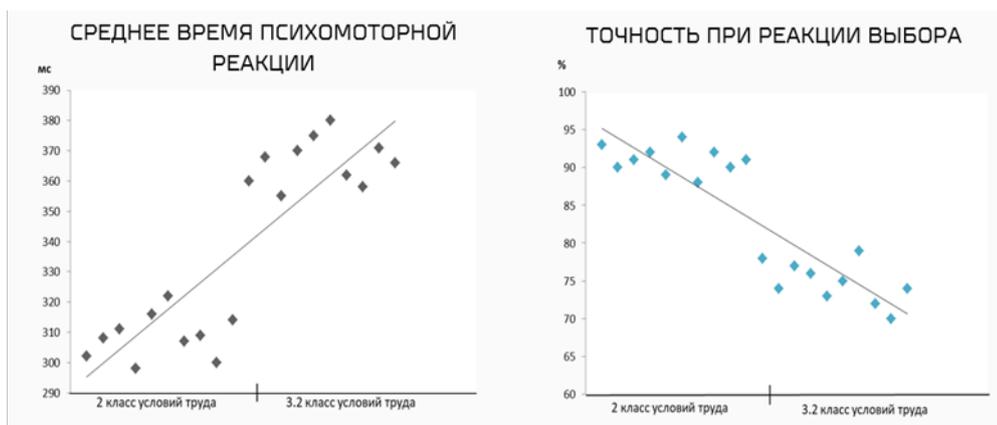


Рисунок 7 – Корреляция между условиями труда и операторской работоспособностью

Выводы. Полученные результаты подчеркивают целесообразность регулярного мониторинга психофизиологического состояния, особенно среди производственного персонала, с целью раннего выявления признаков утомления, нарушения регуляции внимания и реакций, а также принятия профилактических и коррекционных мер для поддержания здорового психофизиологического состояния и безопасности труда.

На основании анализа психофизиологических факторов, влияющих на безопасность труда работников опасных производственных объектов, а также результатов мониторинга их функционального состояния, были разработаны следующие практические рекомендации по внедрению системы предметной психофизиологической диагностики (ППФД) работников на объектах ОПО обрабатывающей промышленности:

1. Разработка и утверждение нормативного акта, регламентирующего порядок проведения ППФД с учетом специфики условий труда на ОПО. Документ должен содержать перечень подлежащих обследованию профессий, используемые методики, а также алгоритм принятия решений о допуске или временном отстранении от работы.

2. Определение пороговых значений показателей, при превышении или снижении которых работник временно не допускается к выполнению обязанностей на ОПО, с обязательной рекомендацией повторной диагностики или направления на медицинское обследование.

3. Разработка профилактических и коррекционных программ, направленных на стабилизацию и укрепление психофизиологического состояния работников. К таким мероприятиям относятся тренинги по стресс-менеджменту, программы психофизиологической разгрузки, сеансы активного отдыха, а также регулярные консультации с психологом и профпатологом.

4. Оснащение медицинского пункта современными техническими средствами, включая автоматизированные тонометры, алкотестеры, пульсометры, а также экспресс-тесты для оценки когнитивных

и эмоциональных функций (внимание, реакция, координация).

Реализация данных рекомендаций позволит сформировать на предприятии устойчивую систему раннего выявления факторов профессионального риска, связанных с психофизиологическим состоянием работников, повысить надежность трудовой деятельности и обеспечить соблюдение требований промышленной безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шадрин Ю.И. Определение сущности и структуры человеческого фактора / Ю.И. Шадрин // Россия молодая: Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20-23 апреля 2021 года / Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. С. 10123.1-10123.5.
2. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 N 776н "Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда" (Зарегистрировано в Минюсте России 14.12.2021 N 66318) // URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 11.06.2025).
3. Федеральная служба государственной статистики // URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 15.06.2025).
4. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 07.04.2025) // URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 11.06.2025).
5. Приказ Минздрава РФ «Об утверждении порядка и периодичности проведения предметных, предсменных, послесменных, послерейсовых медицинских осмотров, медицинских осмотров в течение рабочего дня (смены) и перечня включаемых в них исследований» от 30.05.2023 N 266Н // URL: <https://www.consultant.ru> (дата обращения: 11.06.2025).
6. Управление персоналом. Теория и практика. Психофизиология профессиональной деятельности и безопасность труда персонала: учебное пособие / под редакцией А.Я. Кибанова. — Москва: Проспект, 2012. 72 с. ISBN 978-5-392-02958-7. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/54873> (дата обращения: 14.06.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
7. Коновалов К.В. Психологические аспекты обеспечения безопасности при выполнении электротехнических работ / К.В. Коновалов, Е.А. Захарова // Общество. 2024. № 2-1(33). С. 14-18.
8. Семизорова А.О. Анализ и оценка психофизиологических факторов у сотрудников во время прохождения испытательного срока на работе / А.О. Семизорова // Актуальные проблемы техносферной безопасности: Сборник научных статей национальной научно-практической конференции, Москва: Российский университет транспорта, 2019. С. 35-38.

9. Portola V.A. Open Pits Automobile Transport Impact on the Environment and Labor Safety / V.A. Portola, A. Bobrovnikova, E. Murko // Proceedings of the 9th China-Russia Symposium "Coal in the 21st Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection", Qingdao: Atlantis Press, 2018. P. 345-347. DOI 10.2991/coal-18.2018.63.

10. Щелканова Е.С. Бесконтактная экспресс-диагностика психофизиологического состояния работников опасных производств / Е.С. Щелканова // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2019. № 2. С. 111-120. DOI 10.25016/2541-7487-2019-0-2-111-120.

11. Сальников И.С. Методические и алгоритмические особенности комплекса средств психофизиологической диагностики психоэмоциональных состояний человека / И.С. Сальников, Р.И. Сальников // Проблемы искусственного интеллекта. 2019. № 4(15). С. 51-61.

12. Хусаинова В.В. Автоматизированная система предсменных осмотров в практике угледобывающей компании / В.В. Хусаинова, Л.В. Цай, В.А. Бетехтина // Медицина труда и промышленная экология. 2015. №9. С. 151.

13. Папко Е.В. Способ оценки стрессоустойчивости сотрудников Федеральной противопожарной службы МЧС России для принятия управленческих решений / Е.В. Папко, С.Г. Григорьев, С.Ю. Стукалов // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2022. № 1. С. 109-116. DOI 10.25016/2541-7487-2022-0-1-109-116.

14. Риск повреждения здоровья работающих во вредных и опасных условиях труда и возможность его минимизации / Е.М. Власова, О.Ю. Устинова, Г.З. Файнбург, А.Н. Петров // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей: Материалы I Международной научно-практической конференции, Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. С. 11-24.

Статья поступила в редакцию 25.07.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК: 614.849
EDN: ZEWXLB

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УТЕЧЕК БЫТОВОГО ГАЗА В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

© Авторы 2025
SPIN: 6923-0111
AuthorID: 1165305
ORCID: 0000-0002-3927-5613

ТИМОШЕНКО **Арте́м** **Леони́дович**, преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: artem18181@gmail.com)

SPIN: 1739-4507
AuthorID: 974531
ORCID: 0000-0002-4907-1024

БУЛАТОВ **Вячеслав** **Оле́гович**, кандидат технических наук, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: 79112231238@ya.ru)

ORCID: 0000-0003-3624-718X

АГАФОНОВ **Алексе́й** **Викторо́вич**, старший преподаватель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр, д. 149, e-mail: agafonov@igps.ru)

Аннотация. В работе представлено исследование, направленное на оптимизацию численного моделирования утечек бытового газа (метана) в типовой многокомнатной квартире. Моделирование выполнено в программном комплексе *Fire Dynamics Simulator (FDS)*. Целью работы было сокращение вычислительных затрат при прогнозировании времени достижения взрывоопасной концентрации газа. На основе кратковременных расчетов с использованием метода наименьших квадратов разработан метод экстраполяции, позволяющий с достаточной точностью (погрешность 7-24.6%) прогнозировать момент достижения нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР). Предложены практические коэффициенты для корректировки прогноза, что позволяет значительно ускорить процесс моделирования и анализ рисков. Доказана возможность прогнозирования времени достижения НКПР на основе ограниченных по времени расчетов. Определены корректирующие коэффициенты, повышающие надежность прогноза. Получены количественные данные о динамике накопления газа в различных точках помещения, демонстрирующие критическое влияние вентиляции и открытых дверных проемов на скорость образования взрывоопасной среды.

Ключевые слова: бытовой газ, метан, утечка газа, пожарная безопасность, численное моделирование, *FDS*, *PyroSim*, НКПР, оптимизация расчетов.

METHOD FOR OPTIMIZING THE COMPUTATIONAL TIME OF DOMESTIC GAS LEAK SIMULATIONS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

© The Author(s) 2025

TIMOSHENKO **Artem** **Leonidovich**, lecturer at the Department of Fire and Rescue Equipment and Automotive Engineering
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149, e-mail: artem18181@gmail.com)

BULATOV **Vyacheslav** **Olegovich**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Criminalistics and Engineering and Technical Expertise
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149, e-mail: 79112231238@ya.ru)

AGAFONOV **Alexey** **Viktorovich**, senior lecturer of the Department of Fire and Rescue Equipment and Automotive Engineering
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149, e-mail: agafonov@igps.ru)

Abstract. This study presents research aimed at optimizing the numerical simulation of domestic gas (methane) leaks in a standard multi-room apartment. The modeling was performed using the Fire Dynamics Simulator (FDS) software package. The objective of the work was to reduce computational costs in predicting the time to reach an explosive gas concentration. Based on short-term calculations using the least squares method, an extrapolation

technique was developed, allowing for the prediction of the Lower Flammability Limit (LFL) arrival time with sufficient accuracy (error of 7-24.6%). Practical coefficients for forecast adjustment are proposed, which significantly accelerate the simulation process and risk analysis. The feasibility of predicting the LFL arrival time based on time-limited calculations has been proven. Corrective coefficients that enhance forecast reliability have been determined. Quantitative data on the dynamics of gas accumulation in various points of the premises were obtained, demonstrating the critical influence of ventilation and open doorways on the rate of formation of an explosive atmosphere.

Keywords: domestic gas, methane, gas leak, fire safety, numerical simulation, *FDS*, *PyroSim*, Lower Flammability Limit (LFL), calculation optimization.

Для цитирования: Тимошенко А.Л. Метод оптимизации времени моделирования утечек бытового газа в жилых зданиях / А.Л. Тимошенко, В.О. Булатов, А.В. Агафонов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 193-201. – EDN: ZEWXLB.

Введение. Бытовой газ, основу которого составляет метан, широко используется в жилых зданиях для нужд отопления, приготовления пищи и горячего водоснабжения, обеспечивая тем самым комфортные условия проживания. Однако, потенциальная опасность, связанная с утечками этого газа, требует пристального внимания.

Как низкоуглеродный и чистый источник энергии, природный газ получил широкое распространение для производственно-бытовых нужд в последние годы и становится все более важной альтернативной энергией в глобальном переходе к зеленой энергетике. Согласно статистическому обзору мировой энергетики в 2021 году, глобальные блокировки в условиях пандемии оказали огромное влияние на энергетические рынки в 2020 году, и хотя цены на газ упали до самого низкого уровня за последние годы, их доля в первичной энергии достигла исторического максимума в 24,7% [1]. В то же время, согласно отчету, совместно опубликованному Международным энергетическим агентством (МЭА) и Институтом энергетических исследований Пекинского университета, мировой спрос на природный газ продолжит расти в течение следующих четырех лет, что обусловлено устойчивым ростом спроса. К 2026 году спрос на природный газ достигнет почти 4,3 трлн кубометров, что на 7% выше, чем до COVID-19 [2].

Рост мирового потребления природного газа неизбежно будет способствовать прокладке газопроводов чаще всего в бытовых нуждах для граждан [3]. С вводом в эксплуатацию большого количества трубопроводов, городских станций и газотранспортных станций уровень аварийности в процессе хранения и транспортировки природного газа показал тенденцию к росту в жилых зданиях. Задачи обеспечения безопасной эксплуатации и ликвидации аварий газопроводов и станций приобретают первостепенное значение. В случае утечки газа могут произойти такие аварии, как пожары и взрывы, которые не только приведут к материальным потерям, ущербу окружающей среде, человеческим жертвам, но и могут иметь серьезные неблагоприятные последствия для политики и общества. Для аварий с утечкой газа и взрывом, которые происходят в условиях высокой закупок, разрушение строительных конструкций жилых помещений часто приво-

дит к тому, что развитие взрывных волн становится непредсказуемым, что приводит к усилению последствий аварии. Минимизация рисков, связанных с утечками бытового газа, является важной задачей для обеспечения безопасности населения и сохранности жилищного фонда.

Наибольшее количество пожаров в зданиях жилого назначения в 2023 году зарегистрировано в многоквартирных жилых домах – 30234 пожара, на которых погибло 3 812 человек, в том числе 234 несовершеннолетних, и получили травмы 2147 человек.

Утечка бытового газа является одной из основных причин взрывов и пожаров в жилых зданиях, приводящих к серьезным разрушениям и, к сожалению, нередко к человеческим жертвам. В многоквартирных жилых домах произошло 29 176 пожаров, на которых погибло 2 224 человека, в том числе 99 несовершеннолетних, и получили травмы 3 141 человек. На иные объекты жилого назначения, в том числе дачные (садовые дома, бани, надворные постройки и т.п.), приходится 48 869 пожаров, на которых погибло 844 человека и получили травмы 1 089 человек [4, 5] (рис. 1).

С 2020 по 2023 года отмечается тенденция снижения количества пожаров, связанных с использованием газовых плит в жилых зданиях. Тем не менее количество таких аварий остается высоким и несет за собой большие материальный ущерб и человеческие потери.

Методология. Традиционные методы обеспечения пожарной безопасности часто оказываются недостаточными для адекватной оценки рисков в сложных и непредсказуемых ситуациях. В связи с этим, все большее значение приобретают современные методы моделирования, позволяющие детально анализировать процессы распространения газа и оценивать влияние различных факторов на формирование взрывоопасных концентраций. При этом моделирование сложных газодинамических процессов в условиях аварий могут занимать несколько часов и даже дней.

Целью работы является оптимизация процесса моделирования утечки бытового газа в типовой многоквартирной квартире с помощью имитационной модели *Fire Dynamics Simulator (FDS)*.

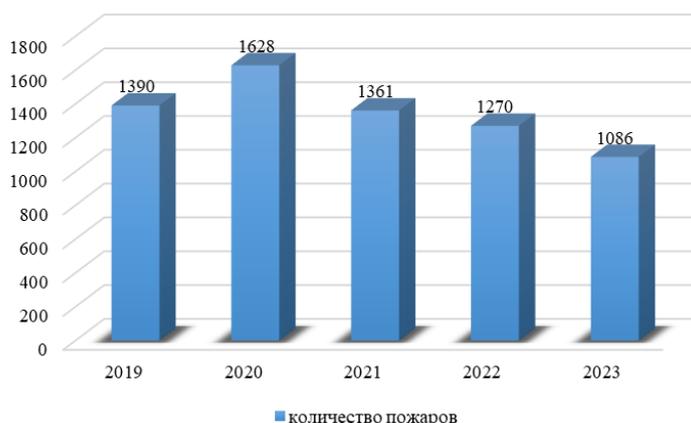


Рисунок 1 – Количество пожаров по данным ВНИИПО МЧС России от утечки бытового газа в России за период 2019 – 2023 гг.

Для этого необходимо построить 3D-модель типовой квартиры в графическом предпроцессоре *PyroSim*; провести численное моделирование утечки метана из конфорки газовой плиты; выполнить анализ динамики концентрации газа в двух ключевых точках (над плитой и у вентиляции) при открытых и закрытых дверях; использовать метод наименьших квадратов и степенного тренда для экстраполяции времени достижения НКПР (нижнего концентрационного предела распространения пламени) на основе коротких начальных расчетов; проверить точность прогноза путем проведения полномасштабного моделирования.

Результаты имеют прямую практическую ценность для проектировщиков, надзорных органов и могут быть использованы для разработки более эффективных мер противопожарной защиты и систем газового мониторинга в жилых зданиях.

Основные требования безопасности газопотребления в жилых зданиях изложены в нормативных документах, регламентирующих различные этапы жизненного цикла объектов: проектирования [6-8], монтажа и пусконаладки [9], эксплуатации [10, 11] и надзора [12, 13].

Стоит отметить следующие научные труды, внесшие большой вклад в решение проблем взрывопожароопасности обращения природного газа: А.А. Комаров [14], Л.П. Вогман [15], Р.А. Загуменников [16], Е.Е. Простов [17], В.В. Тимохин [18], П.Н. Бугаев [19].

Для численного моделирования распространения газа в помещении использовался программный комплекс *Fire Dynamics Simulator (FDS)*. *FDS* решает уравнения Навье-Стокса, описывающие движение газов и теплопередачу, с использованием метода конечных объемов.

Для проведения численного моделирования в программном комплексе *PyroSim* была разработана 3D-модель жилой квартиры площадью 75 м² (рис. 2).

Модель включает в себя основные функциональные зоны: кухню (с представлением газовой плиты как источника утечки), гостиную, спальню,

коридор, лоджию и санузел. Вентиляционный канал был представлен как отдельный элемент, соединенный с кухней. Геометрия помещений создавалась с использованием встроенных инструментов *PyroSim* на основе имеющихся планов квартиры.

При создании модели были приняты следующие допущения: исключены мелкие детали интерьера (мебель, предметы декора), не влияющие на газодинамику; стены, пол и потолок представлены как идеально ровные поверхности; дверные проемы смоделированы с учетом их реальных размеров и положения.

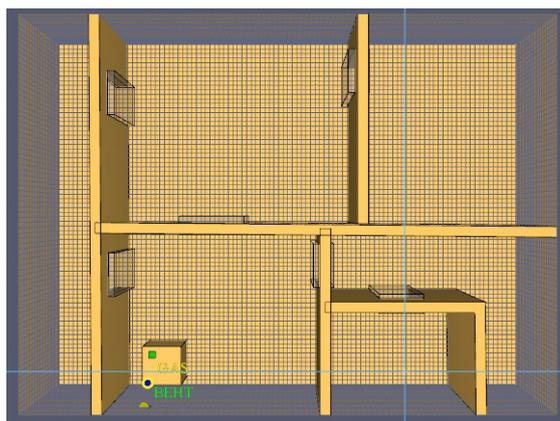
Модель многокомнатной квартиры разделена на функциональные зоны (спальня, кухонная зона, коридор, санузел, лоджия). Размеры квартиры составляют 11,7 м (длина) × 8,5 м (ширина) × 2,7 м (высота) (рис. 2).

Данная схема квартиры типична для квартир российского стандарта и чаще всего представлена в квартирах нового типа многоквартирных домов, начиная с квартир 2000-го года построения.

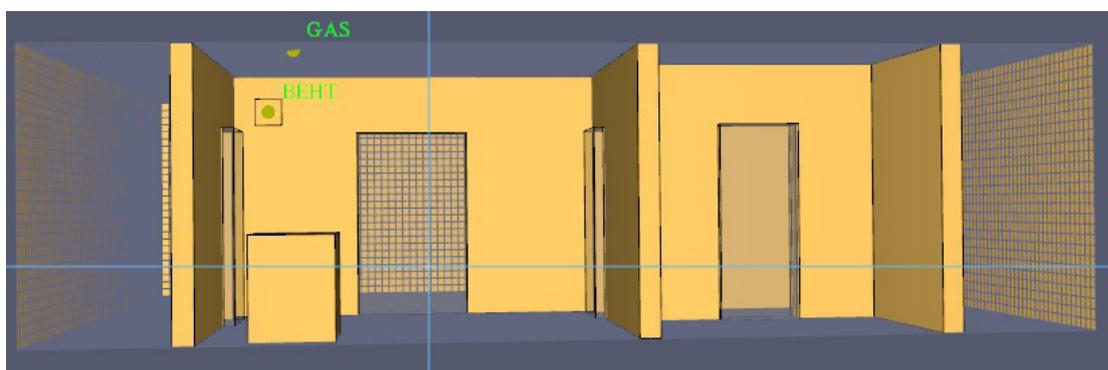
В качестве моделируемого газа использовался метан (CH_4), являющийся основным компонентом бытового газа (98% от общего состава). Расход газа: 5·10⁻⁵ л/с (типичные значения для работающей конфорки). Время моделирования: 1000 сек.

Нормы расположения вентиляционного отверстия над газовой плитой в жилых зданиях строго регламентированы. Расположение вентиляционного отверстия в модели соответствуют нормам проектирования [20].

В соответствии с руководством по эксплуатации типовых бытовых сигнализаторов загазованности природным газом датчик должен устанавливаться в месте наиболее вероятного скопления природного газа не менее 1 метра от газового прибора и не ближе 50 см от форточек и мест притока воздуха (окон) [21]. Для чего в двух точках кухни были установлены датчики концентрации метана: 1. *Vent* – по центру вентиляционного отверстия на стене. 2. *Gas* – под потолком над газовой плитой (наиболее вероятное место скопления метана).



а)



б)

Рисунок 2 – Модель многокомнатной квартиры: а) вид сверху; б) вид сбоку

Результаты. Графики изменения концентрации метана по времени от 0 до 1000 секунд при открытых (рис. 3-6) и закрытых дверях (рис. 7-10).

Методом наименьших квадратов по эмпирическим данным определено уравнение и величина достоверности аппроксимации. Учитывая физику изменения концентрации метана по времени в помещении выбран подходящий тип линии тренда (степенная).

Методом экстраполяции по полученным уравнениям тренда были спрогнозированы моменты достижения НКПР метана в выбранных точках помещения. Данные временные значения дают возможность определить предполагаемое время моделирования, которое устанавливается в «Параметрах моделирования» в *FDS*. Данный метод позволяет с высокой достоверностью спрогнозировать момент достижения НКПР и оптимизировать длительность расчетов. Проектировщик задает в *FDS* время, близкое к прогнозируемому, плюс небольшой запас.

Примечание: на рисунках 3, 4, 7, 8 в уравнениях тренда y – концентрация метана (%), x – время (с), R^2 – коэффициент детерминации, характеризующий точность аппроксимации.

На графике синей линией показаны результаты моделирования (эмпирические данные), оранжевой линией – аппроксимирующая степенная зависимость, полученная методом наименьших квадратов.

Прогнозируемое время достижения НКПР в точке *Gas* (с открытыми дверями), полученное на основе аппроксимации эмпирических данных степенной функцией методом наименьших квадратов (уравнение $y=0,0474x^{0,4829}$ представлено на рисунке 3), составило 197,9 минут.

На моделирование процесса утечки продолжительностью 17 минут (1000 с) компьютером было затрачено 39 минут (2340 с).

Прогнозируемое время достижения НКПР в точке *Vent* (с открытыми дверями), рассчитанное по уравнению тренда $y=0,0277x^{0,4501}$, составило 1296 минут (77 760 с), где y – концентрация метана (%), x – время достижения НКПР (с).

Для проверки прогноза методом наименьших квадратов в *FDS* смоделирована утечка метана на кухне с открытыми дверями в течении 250 минут (15000 с) при ранее заданных условиях (рис. 5, 6).

На моделирование процесса утечки продолжительностью 250 минут (15000 с) компьютер затратил 588 минут (35280 с). Такая продолжительность расчетного времени (588 минут) для моделирования физического процесса длительностью 250 минут связана с высокими вычислительными затратами программного комплекса *FDS*, который решает систему трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса для моделирования турбулентных течений, что требует значительных ресурсов даже для относительно простой геометрии.

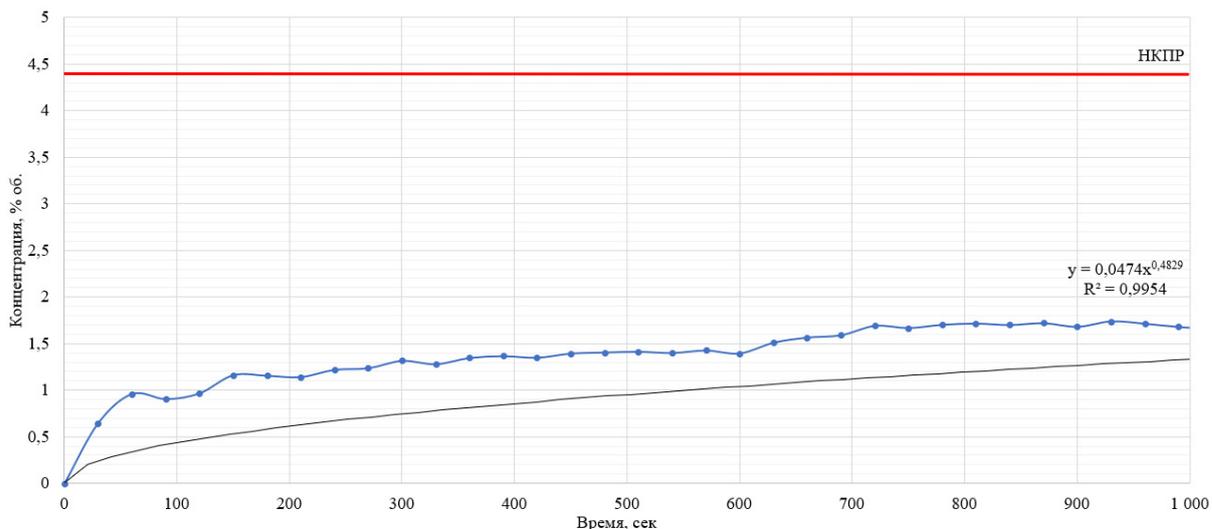


Рисунок 3 – Динамика изменения концентрации метана по времени под потолком (с открытыми дверями)

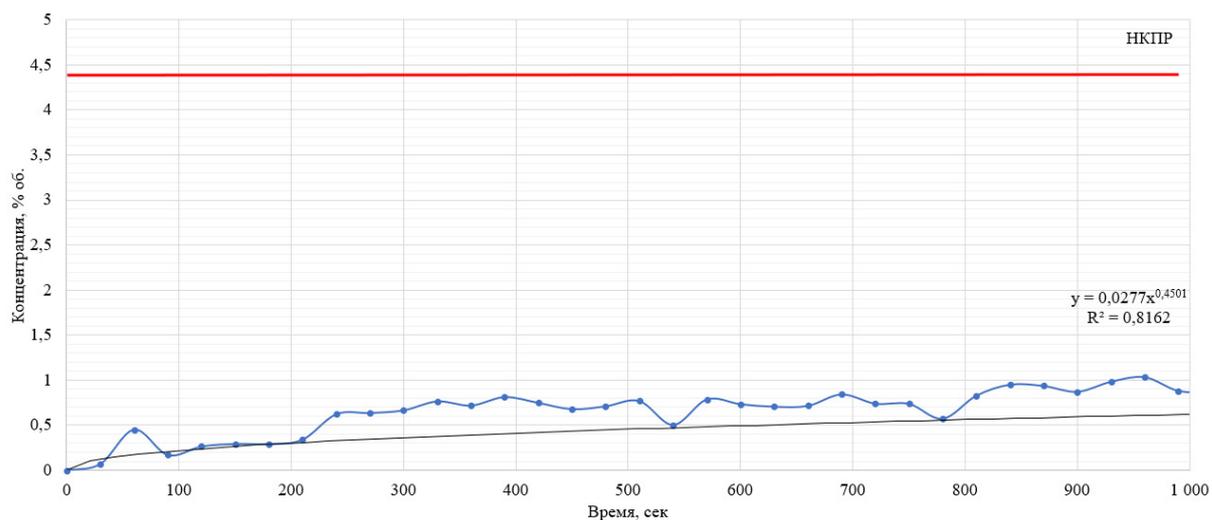


Рисунок 4 – Динамика изменения концентрации метана по времени у вентиляционного отверстия (двери открыты)

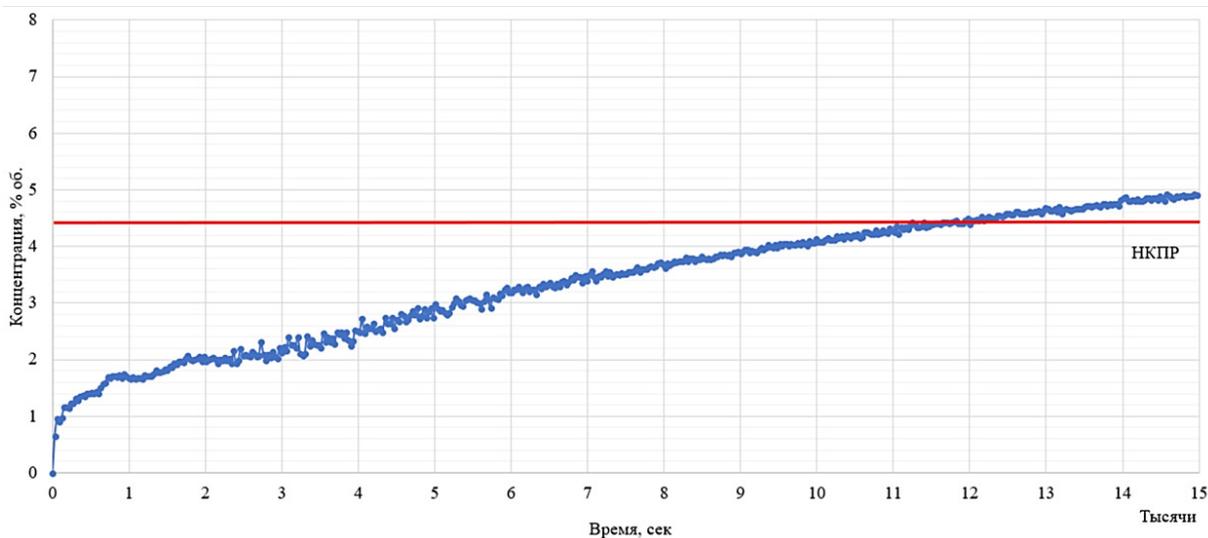


Рисунок 5 – Динамика изменения концентрации метана по времени под потолком (двери открыты)

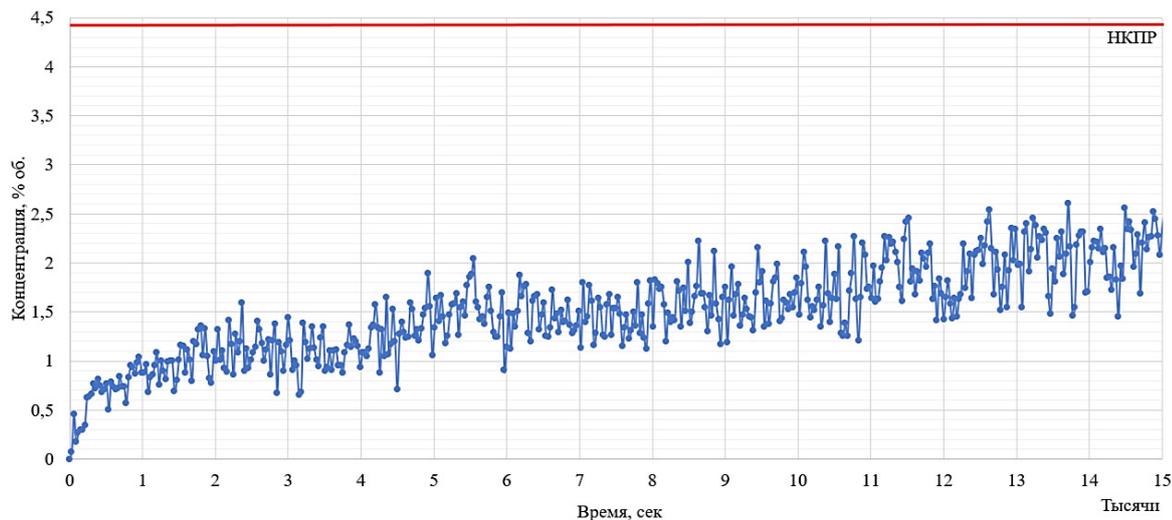


Рисунок 6 – Динамика изменения концентрации метана по времени у вентиляционного отверстия (двери открыты)

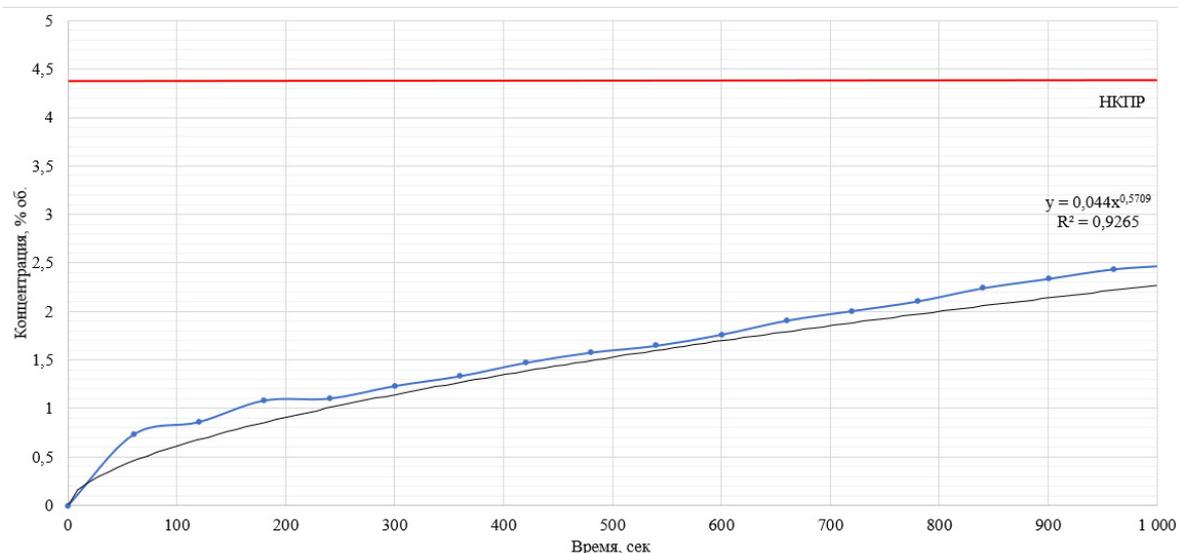


Рисунок 7 – Динамика изменения концентрации метана по времени под потолком в первые 1000 секунд утечки (двери закрыты)

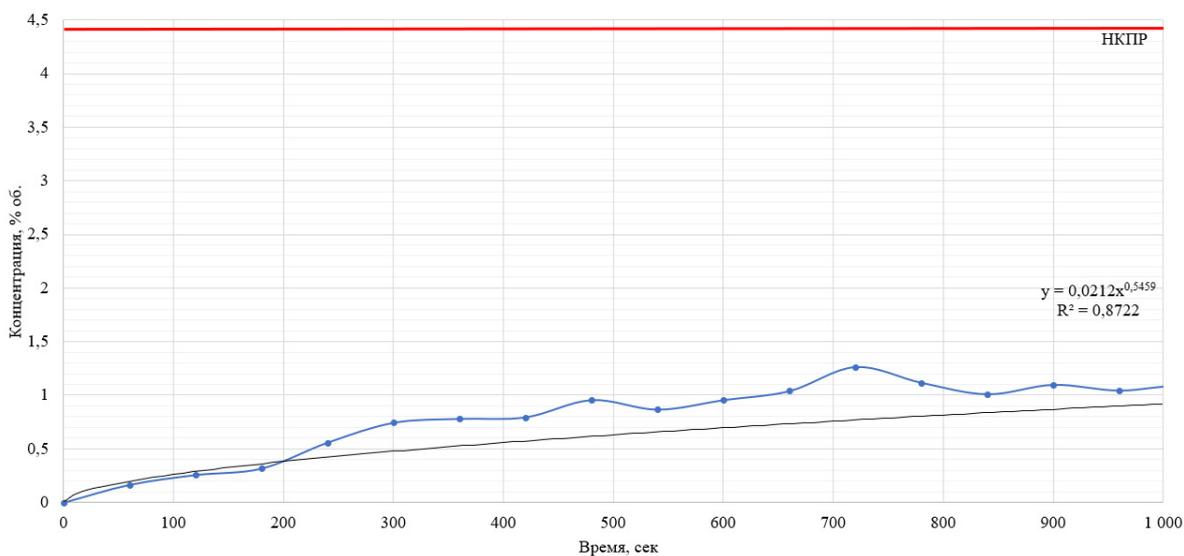


Рисунок 8 – Динамика изменения концентрации метана по времени у вентиляционного отверстия в первые 1000 секунд утечки (двери закрыты)

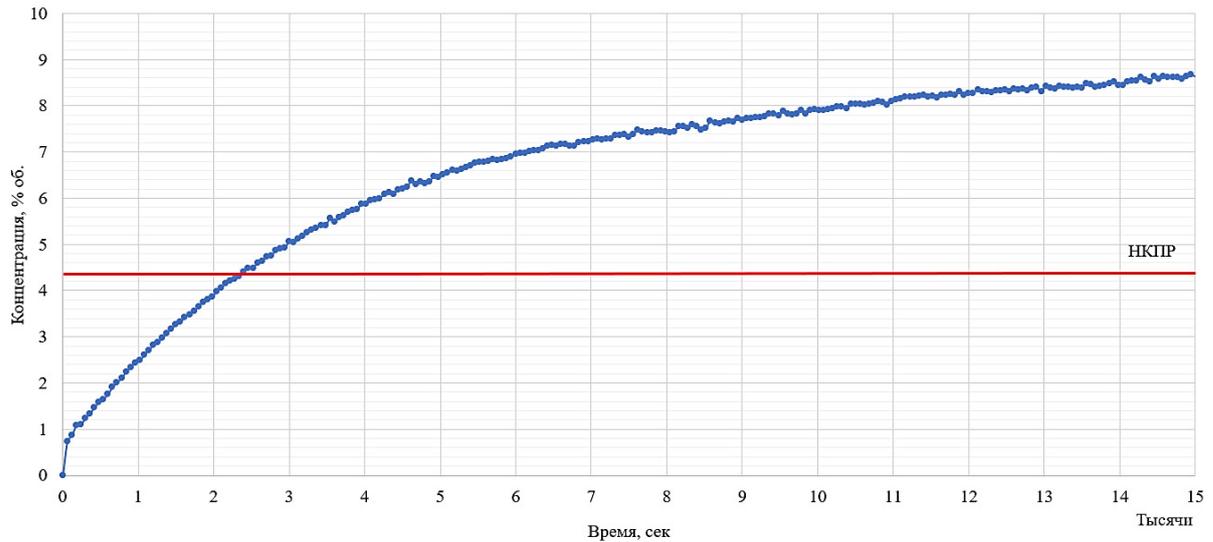


Рисунок 9 – Динамика изменения концентрации метана по времени под потолком за 250 секунд утечки (двери закрыты)

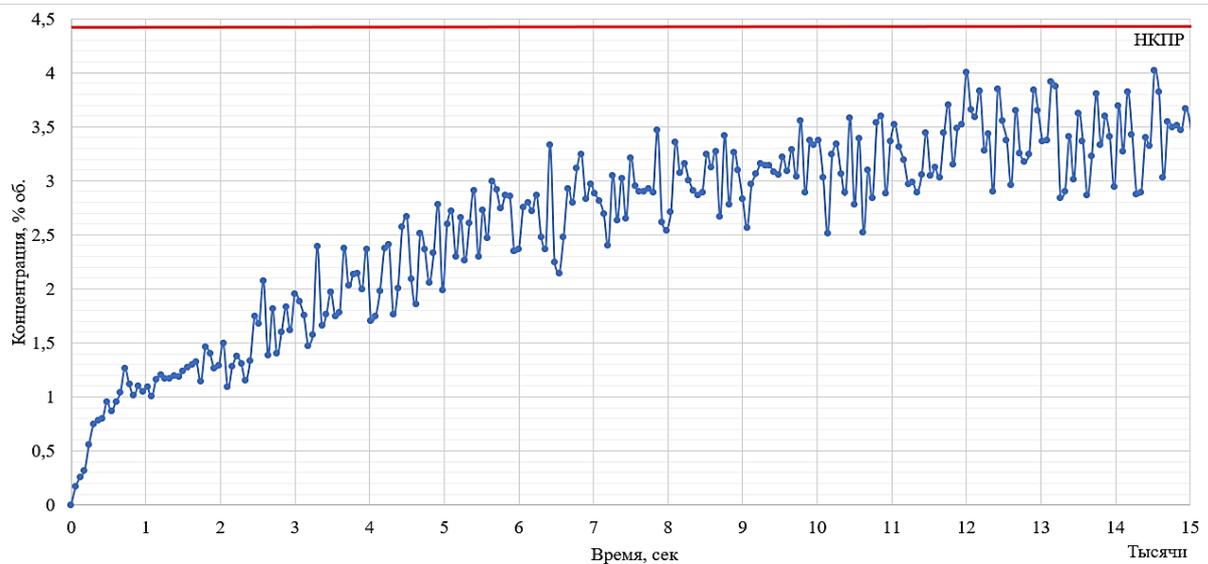


Рисунок 10 – Динамика изменения концентрации метана по времени у вентиляционного отверстия за 250 минут утечки (двери закрыты)

Согласно результатам полномасштабного моделирования в *FDS* (рис. 5, 6), НКПР в точке «*Gas*» достигнут на момент времени 184 минуты, максимальная концентрация – 4,9% (об.). В точке «*Vent*» НКПР так и не было достигнуто, а максимальная концентрация в данной точке составила 2,6% (об.) через 4,2 часа.

Погрешность прогнозного значения времени достижения НКПР метана (при открытых дверях на кухне) оказалась 7%: $\tau_{\text{прогн}}$ (197,9 мин.) < τ_{FDS} (184,0 мин.), где τ_{FDS} – время, полученное в результате полномасштабного моделирования в *FDS*.

Прогнозируемое время достижения НКПР в точке *Gas* (с закрытыми дверями) – 53,1 минуты (3186 с), рассчитанное по уравнению тренда $y=0,044x^{0,5709}$.

Прогнозируемое время достижения НКПР в точке *Vent* (с закрытыми дверями) – 292,7 минут (17562 с),

рассчитанное по уравнению тренда $y=0,0212x^{0,5459}$.

Для проверки прогноза методом наименьших квадратов в *FDS* смоделирована утечка метана на кухне с закрытыми дверями в течении 250 минут при ранее заданных условиях (рис. 9, 10).

Обсуждение. Характерные колебания (пики) концентрации метана у вентиляционного отверстия, наблюдаемые на графике, объясняются нестационарным характером турбулентного течения газа в помещении и динамическим взаимодействием поступающего метана с воздушными потоками в системе вентиляции.

Согласно результатам полномасштабного моделирования в *FDS* НКПР (рис. 9, 10), в точке «*Gas*» достигнут на момент времени 40 минут (2400 с), максимальная концентрация составила 8,7% (об.) в точке «*Vent*» НКПР так и не было достигнуто, а

максимальная концентрация в данной точке составила 4,0 % (об.) через 252 минуты (15 120 с).

Погрешность прогнозного значения времени достижения НКПР метана (при закрытых дверях на кухне) оказалась 24,6%: $\tau_{\text{прогн}}(53,1 \text{ мин.}) < \tau_{\text{FDS}}(40,0 \text{ мин.})$.

Из графика изменения концентрации по времени мы видим, что смоделированные данные по концентрации газа в точках отбора имеют естественный разброс. Степенной тренд является упрощением сложного физико-химического процесса диффузии и перемешивания метана в воздухе. Для компенсации погрешности экстраполяции и упрощения модели предложены практические коэффициенты запаса, рассчитанные как отношение прогнозируемого времени к времени, полученному в полномасштабной FDS-модели: $k = \tau_{\text{FDS}} / \tau_{\text{прогн}}$. Для условий с открытыми дверями $k_{\text{откр}} = 184,0 / 197,9 \approx 0,93$; для условий с закрытыми дверями $k_{\text{закр}} = 40,0 / 53,1 \approx 0,75$. Введение этих коэффициентов позволяет скорректировать прогнозные время и нивелировать неопределенности. Предложенные коэффициенты применимы в рамках проведенного исследования для помещений со схожими геометрическими и вентиляционными параметрами. Их значения зависят от степени герметичности помещения, интенсивности вентиляции и расположения точки измерения.

Утечки бытового газа (метана) в жилых помещениях остаются серьезной угрозой, приводящей к пожарам, взрывам, человеческим жертвам и материальному ущербу. Традиционные методы оценки рисков недостаточны, а точное компьютерное моделирование – ресурсоемко. Программный комплекс FDS является эффективным инструментом для моделирования газодинамических процессов при утечке метана в помещениях сложной геометрии.

Выводы. В ходе исследования данной проблемы проведен анализ аварийности газовых плит в жилых зданиях в Российской Федерации. В среднем в год происходит 1347 таких аварий.

Создана компьютерная модель типовой газифицированной многокомнатной квартиры с конструктивными элементами: вентиляционным отверстием, датчиками загазованности, газовой плитой, конфоркой газовой плиты.

Проведено численное моделирование утечки метана из конфорки газовой плиты выполнен анализ динамики концентрации газа в двух ключевых точках (над плитой и у вентиляции) при открытых и закрытых дверях. НКПР метана под потолком при закрытых дверях достигается в 4,6 раза быстрее. Максимальная концентрация метана у вентиляционного отверстия составила 2,6 % (об.) через 252 минуты при открытых дверях и 4,0 % (об.) – при закрытых.

Для прогнозирования (экстраполяции) времени достижения НКПР (нижнего концентрационного предела распространения пламени) на основе коротких начальных расчетов (1000 секунд) исполь-

зован метод наименьших квадратов и степенного тренда.

Проверена точность прогноза путем проведения полномасштабного моделирования (15000 секунд): погрешность прогнозного значения времени достижения НКПР метана при закрытых дверях на кухне оказалась 24,6 % и 7% – при открытых.

Таким образом, был разработан метод, позволяющий сократить время, затрачиваемое на процесс моделирования достижения НКПР метана на примере утечки бытового газа из конфорки газовой плиты в типовой многокомнатной квартире с помощью имитационной модели *Fire Dynamics Simulator (FDS)*. Метод позволил оптимизировать время моделирования на 93% (с 588 мин. на 39 мин.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Реагирование на первую стадию развития чрезвычайной ситуации - утечку газа в жилых домах города Москвы / П.Н. Бугаев, В.Ф. Мартынюк, Т.Н. Киселева, С.А. Василенко // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2022. – № 2. – С. 81-89.
2. В. Дж. Костовски. Рекуперация энергии и эксергии на компрессорной станции природного газа – технико-экономический анализ и управление энергетическими преобразованиями. - 3-е издание., испр. и доп. 2015. – 20 с.
3. Мишуев, А.В. Интенсификация взрывного горения газо-воздушных смесей в зданиях и сооружениях [Текст] / А.В. Мишуев, В.В. Казеннов, А.А. Комаров, Н.В. Громов // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сборник докладов Международной научной конференции, Москва, 16-18 октября 2013 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2013. – С. 369-372.
4. Государственный доклад «О состоянии и территории Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году»: [версия с QR-кодами] / Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. – Москва: МЧС Медиа, 2025. – 272 с.: ил.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2024 г. Статистика пожаров и их последствий: информационно-аналитический сборник. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2025. 112 с.
6. ГОСТ Р 55472-2019 Сети газораспределения природного газа. Часть 0. Общие положения.
7. СП 54.13330.2016 Свод правил. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция. СНиП 31-01-2003. (утв. приказом Минстроя России от 3 декабря 2016 г. № 883/пр).
8. СП 402.1325800.2018 Здания жилые. Правила проектирования систем газопотребления.
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 20 ноября 2000 г. № 878 «Об утверждении правил охраны газораспределительных сетей».
10. Постановление Правительства РФ от 14.05.2013 № 410 (ред. от 29.05.2023) «О мерах по обеспечению безопасности при использовании и содержании внутридомового и внутриквартирного газового оборудования»
11. ГОСТ 34741-2021 Системы газораспределительные. Требования к эксплуатации сетей газораспределения природного газа.
12. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 531 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления».
13. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 сентября 2020 г. № 1479 «Об утверждении Правил

противопожарного режима в Российской Федерации».

14. Комаров, А.А. Моделирование и расчет давления взрыва газозвушной смеси в здании / А.А. Комаров // Пожсофт 2023: Сборник докладов III научно-практической конференции по программному обеспечению для решения задач пожарной безопасности, Москва, 16-17 ноября 2023 года. – Москва: Автономная некоммерческая организация Научно-методический координационный центр разработки и применения программного обеспечения в области пожарной безопасности «ПожСофт», 2023. – С. 16-21.

15. Пожарная безопасность объектов, связанных с обращением горючих газов / С.А. Шевцов, Д.В. Каргашилов, А.Н. Шуткин [и др.]; Воронежский институт ГПС МЧС России. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2017. – 189 с. – ISBN 978-5-4446-0943-9.

16. Р.А. Загуменников. Экспериментальное исследование и численное моделирование процесса образования взрывоопасной метановоздушной смеси в помещениях / А.А. Комаров, Г.В. Васюков, Р.А. Загуменников, Е.В. Бузаев // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 4. – С. 30-38.

17. Простов, Е. Е. Метод оценки эффективности газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе / Е.Е. Простов // Пожарная безопасность. – 2024. – № 2(115). – С. 40-49. – DOI 10.37657/vniipro.pb.2024.115.2.004.

18. Комаров, А.А. Физическая картина развития аварийных взрывов в смежных помещениях жилых домов / А.А. Комаров, В.В. Тимохин, Ю.В. Тимохин // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 7(271). – С. 51-56.

19. Мартынюк, В.Ф. Классификация взрывов природного газа в помещениях / В.Ф. Мартынюк, П.Н. Бугаев // Переходные режимы горения и детонация, Санкт-Петербург, 22-26 апреля 2024 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «ГОРУС ПРЕСС», 2024. – С. 47-50.

20. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 N 921/пр).

21. Руководство по эксплуатации ЯБКЮ.421453.111 РЭ Сигнализаторы загазованности природным газом СЗ-1А – Саратов: ООО «ЦИТ-Плюс». – С. 20.

Статья поступила в редакцию 24.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 331.45

EDN: WDLWUE

ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 1279-3916

AuthorID: 730124

ORCID: 0000-0001-6399-8902

ScopusID: 57170233100

ЗАКИРОВА Альфия Резавановна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»

*Уральский государственный университет путей сообщения
(620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

Аннотация. Анализ травматизма в дистанциях электроснабжения Свердловской железной дороги за период с 1966 по 2022 годы выявил устойчивую тенденцию ежегодных смертельных случаев среди электротехнического персонала вследствие воздействия постоянного электрического тока. Несмотря на меры предосторожности, проблема остаётся актуальной и требует комплексного подхода к её решению. Автор отмечает введение новых государственных стандартов, значительно отличающихся от прежних норм предельно допустимых уровней (ПДУ). Основные отличия заключаются в установлении требований к параметрам напряжения прикосновения, величины тока и длительности непрерывного воздействия на персонал. Основной задачей исследования стало доказательство безопасности установленных пределов допустимого значения постоянного электрического тока, воздействующего на электротехнический персонал. Для достижения поставленной цели была разработана методика, позволяющая объективно оценивать ключевые факторы риска при поражениях электрическим током: величины напряжений и токов, временные ограничения на воздействие, сопротивление тела человека. Проведённый расчёт энергии постоянного электрического тока, поглощённой организмом, позволил установить чёткую связь между продолжительностью воздействия и степенью опасности. Результаты исследований указывают на необходимость внесения изменений в действующие нормативы по временному ограничению влияния электрического тока на человеческий организм, что создаст основу для повышения уровня безопасности труда и сокращения количества производственных травм.

Ключевые слова: электрический ток, безопасность, травматизм, энергия, электротехнический персонал, предельно допустимые уровни токов, травма, напряжение прикосновения.

APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF DIRECT CURRENT ELECTRICAL ENERGY

© The Author(s) 2025

ZAKIROVA Alfia Rezavanovna, candidate of technical sciences,
associate Professor of the Department «Technosphere Safety»

*Ural State University of Railway Transport
(620034, Russia, Yekaterinburg, Kolmogorov St., 66, e-mail: AZakirova@usurt.ru)*

Abstract. Analysis of traumatic incidents within the electric power supply distances of the Sverdlovsk Railways over the period from 1966 to 2022 has identified a consistent trend of annual fatalities among electrical engineering staff caused by exposure to direct current. Despite preventive measures, the problem remains urgent and calls for an integrated solution. The author highlights the adoption of new national standards that differ considerably from earlier permissible limit values (PLV). The primary distinctions lie in setting requirements for touch voltage parameters, current intensity, and continuous exposure duration for personnel. The core aim of the research is to demonstrate the safety of established allowable thresholds for direct current affecting electrical engineers. To accomplish this objective, a method was devised enabling objective assessment of critical risk factors related to electric shocks: voltage and current magnitudes, exposure time restrictions, and human body resistance. Calculation of the energy absorbed by the organism from direct current made it possible to establish a clear correlation between exposure duration and danger level. Study results indicate the need for amendments to current regulatory norms concerning temporary restrictions on the influence of electric current on the human body, thereby laying the foundation for enhancing work safety and reducing industrial injuries.

Keywords: electric current, safety, injury, energy, electrical personnel, permissible current levels, trauma, contact voltage.

Для цитирования: Закирова А.Р. Подходы к оценке энергии постоянного электрического тока / А.Р. Закирова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 202-207. – EDN: WDLWUE.

Введение. Электротехнический персонал при обслуживании электроустановок подвергается воздействию опасных производственных факторов, что приводит к травматизму [1-8]. Анализ травматизма в России с летальным исходом на поднадзорных Ростехнадзору энергетических объектах за период 2020-2024 годов (рис. 1) показывает, что ежегодно электротехнический персонал подвергается воздействию электрического тока [9].

Из рисунка 1 видно, что ежегодно происходят несчастные случаи со смертельным исходом. Подобная картина наблюдается и в энергетическом комплексе ОАО «РЖД»: 45% от общего числа травматических случаев [10] связаны с производственными факторами.

Анализ травматизма по поражающим факторам в дистанциях электроснабжения Свердловской

железной дороги за период с 1966 по 2022 год показал, что по видам происшествий 28,7% составляют поражения персонала электрическим током [11]. С 2012 по 2020 год произошло 97 случаев травмирования электротехнического персонала электрическим током.

Так как данная статья посвящена воздействию на персонал постоянного тока, рассмотрим распределение электрических травм на контактной сети постоянного тока энергетического комплекса ОАО «РЖД» с 2012 по 2020 год [10], приведённое на рисунке 2.

Компания ОАО «РЖД» осознаёт проблему и стремится к нулевому травматизму, однако пока не достигает желаемого результата. Проблема воздействия электрического тока на персонал является актуальной и требует решений.

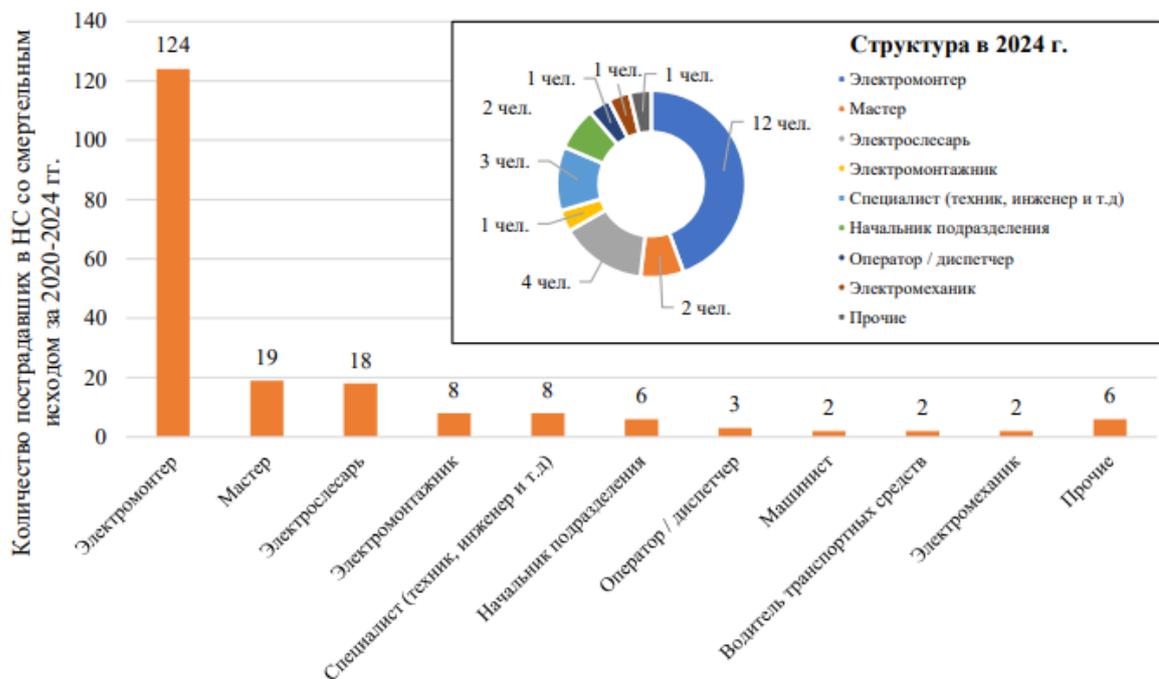


Рисунок 1 – Распределение погибших в НС со смертельным исходом за 2020-2024 гг. по профессиям (должностям)



Рисунок 2 – Распределение электрических травм на контактной сети постоянного тока энергетического комплекса ОАО «РЖД» с 2012 по 2020 г [10]

Компания ОАО «РЖД» осознаёт проблему и стремится к нулевому травматизму, однако пока не достигает желаемого результата. Проблема воздействия электрического тока на персонал является актуальной и требует решений.

Методология. Цель статьи состоит в обосновании безопасности действующих нормативных значений постоянного электрического тока, влияющего на электротехнический персонал. Для этого была разработана методология, обеспечивающая объективную оценку ключевых факторов риска поражения электрическим током, включая величину напряжения прикосновения и тока, продолжительность воздействия и сопротивление человека.

В ходе исследования проводился обзор научной литературы, анализ существующих исследований по тематике, а также теоретический метод анализа поглощения электрического тока различными участками человеческого тела.

Одним из возможных решений данной проблемы могло бы стать запрещение электромонтёрам контактной сети проводить обслуживание оборудования под напряжением, исключив таким образом источник опасности. Однако, ввиду технологических процессов, связанных с движением подвижного состава, этот подход применим не во всех подразделениях ОАО «РЖД». Возможно использование и других решений, содержащих организационные, технические и методические подходы. Данная статья рассматривает именно методическое обеспечение. Проведённый анализ нормативных документов по предельно допустимым уровням (ПДУ) напряжения прикосновения и токов показал, что в настоящее время действуют три стандарта ГОСТ [12-14]. Предельно допустимые уровни токов и напряжений прикосновения при нормальном режиме работы электроустановки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – ПДУ токов и напряжений прикосновения

Род тока	ПДУ [13]	
	U_{np} , В	I , мА
Постоянный	5	2

Если превышение ПДУ не наблюдается, то рассматриваемые опасные факторы производственной среды будут безопасны для персонала. В данных ПДУ не указана величина продолжительности безопасного воздействия на персонал, которая влияет на исход поражения. Как определить это безопасное время? Обратимся к ГОСТу [15], в котором содержится информация по продолжительности воздействия на человека (табл. 2).

Таблица 2 – ПДУ токов и напряжений прикосновения

Род тока	ПДУ [15]	
	U_{np} , В	I , мА
Постоянный	8	1
Время воздействия, с	600	

Из таблицы 2 видно, что безопасное предельное время воздействия составляло 10 минут или 600 секунд, но ПДУ были иными. При сравнении с действующими ПДУ уровни напряжения прикосновения увеличились, а величина тока уменьшилась. Возникает следующий вопрос: изменилось ли безопасное время воздействия? Как одновременно учесть оба параметра при воздействии на персонал?

Для решения проблемы необходим новый метод оценки параметров, влияющих на исход поражения человека электрическим током, который позволит учитывать одновременно указанные параметры. Предложено оценить количество поглощённой телом человека энергии постоянного тока по следующей формуле, мВт·с:

$$\mathcal{E} = I^2 \cdot t \cdot R$$

$$\text{или } \mathcal{E} = I \cdot U_{np} \cdot t \quad (1)$$

где I – ток, протекающий через тело человека, мА; t – длительность воздействия, с; R – активное сопротивление тела человека, Ом; U_{np} – напряжение прикосновения (В).

Тогда ПДУ количество поглощённой телом человека энергии постоянного тока можно определить по формуле, мВт·с:

$$\mathcal{E}(ПДУ) = I_2(ПДУ) \cdot t(ПДУ) \cdot R(ПДУ)$$

$$\text{или } \mathcal{E}(ПДУ) = I(ПДУ) \cdot U_{np}(ПДУ) \cdot t(ПДУ) \quad (2)$$

где $I(ПДУ)$ – ПДУ тока, протекающего через тело человека, мА; $U_{np}(ПДУ)$ – ПДУ напряжения прикосновения, (В); $t(ПДУ)$ – предельно допустимое время воздействия, с; $R(ПДУ)$ – ПДУ активного сопротивления тела человека, Ом.

Результаты. Протестируем предложенный метод и попробуем с его помощью определить предельно допустимое время нахождения персонала. Проведя несложные математические расчёты, получаем, что количество поглощённой телом человека энергии постоянного тока для данных, указанных в таблице 2, составляет 4,8 Вт·с, а для данных таблицы 1 – 6 Вт·с.

При условии, что обеспечиваемое безопасное время воздействия не изменилось, расчётное количество поглощённой телом человека энергии постоянного тока получается разным. Это значит, что пребывание в течение 10 минут для указанных условий не будет безопасным.

Можно предположить, что воздействие на человека при напряжении прикосновения $U_{np} = 8$ В и силе тока $I = 1$ мА в течение 10 минут аналогично воздействию при $U_{np} = 5$ В и $I = 2$ мА в течение 8 минут, поскольку в обоих случаях тело человека поглощает одно и то же количество энергии постоянного тока.

Соответственно, предел допустимой поглощённой телом человека энергии постоянного тока составит 4,8 Вт·с при нормальной работе электроустановки.

Если же электроустановка находится в режиме короткого замыкания, то ПДУ напряжения прикосновения (В) и тока (мА) будут другие. Рассмотрим вышеуказанные факторы. В соответствии с ГОСТ Р 12.1.038-2024 [13] и общепринятыми временными

и токовыми характеристиками, определяющими воздействие постоянного тока на человека, построены зависимости изменения ПДУ напряжения прикосновения (В) и тока (мА), проходящего через тело человека, от продолжительности воздействия (процентильный ранг – 95%) (рис. 3).

При кратковременном воздействии пороговые значения рассматриваемых параметров значительно выше, чем при длительном воздействии. На рисунке 4 показаны кривые изменения U_{np} и I относительно безопасного времени воздействия на персонал, видно, что имеется полиномиальная зависимость третьего порядка. Поэтому ПДУ напряжения прикосновения (В) от продолжительности воздействия можно определить:

$$y = -1458,3x^3 + 2346,6x^2 - 1216,3x + 386,96 \quad (3)$$

ПДУ тока (мА), проходящего через тело человека от продолжительности воздействия можно рассчитать:

$$y = -1707,8x^3 + 3039,2x^2 - 1718,5x + 473,96 \quad (4)$$

Для того чтобы узнать точные ПДУ тока или напряжения прикосновения для продолжительности воздействия до 1 секунды нужно подставить в формулы (3) или (4) вместо x необходимое время и результат будет соответствовать ПДУ рассматриваемых факторов.

Впервые построена кривая изменения количества поглощённой телом человека энергии постоянного

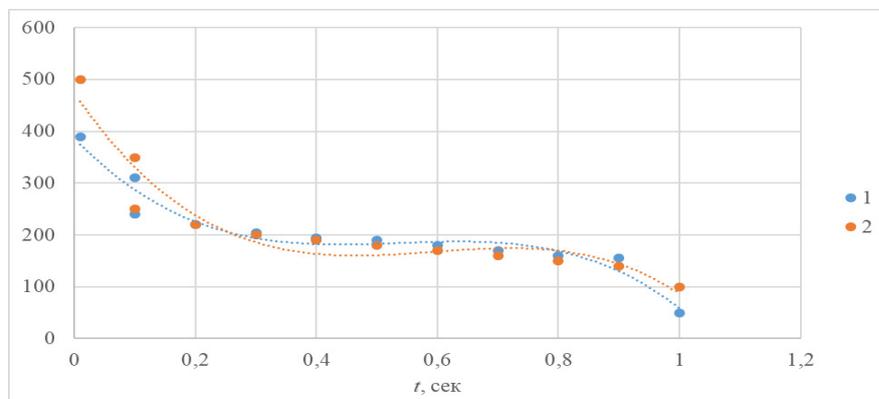
тока от продолжительности воздействия.

Определён полином пятого порядка с коэффициентом детерминации $R^2=0,95$. Так как $R^2>0,7$, это говорит о сильной взаимосвязи между рассматриваемыми переменными. Полученная математическая модель позволяет определять количество поглощённой телом человека энергии постоянного тока в зависимости от продолжительности воздействия электрического тока и напряжения прикосновения.

Конечно, количество поглощённой телом человека энергии постоянного тока можно определить и через ПДУ активного сопротивления тела человека. В таком случае необходимо использовать зависимость ПДУ активного сопротивления тела от ПДУ напряжения прикосновения при аварийном режиме работы электроустановок (рис. 5).

Построена степенная функция распределения и определена математическая модель изменения ПДУ активного сопротивления тела от напряжения прикосновения (процентильный ранг – 95%; среда – сухое помещение). Показатель детерминации $R^2>0,7$ свидетельствует о наличии сильной корреляционной взаимосвязи между рассматриваемыми факторами, что позволяет использовать данную модель для прогнозирования.

Работодатель может достичь установленных ПДУ путём применения технических средств защиты [16-21].



1 – ПДУ напряжения прикосновения, В; 2 – ПДУ тока, мА

Рисунок 3 – ПДУ напряжения прикосновения и тока, проходящего через тело человека в зависимости от продолжительности воздействия

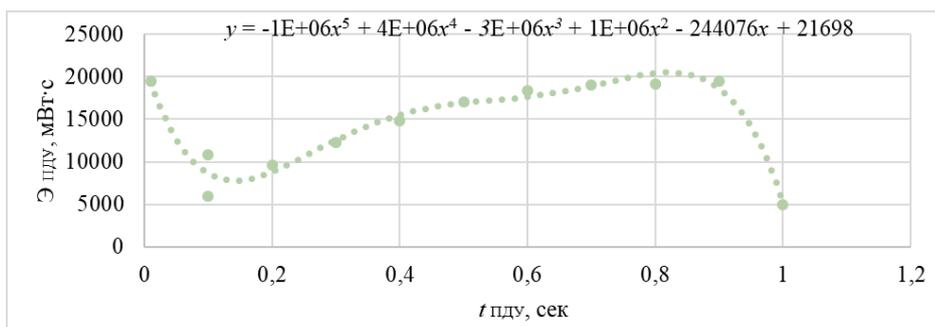


Рисунок 4 – Зависимость изменения количества поглощённой телом человека энергии постоянного тока в зависимости от продолжительности

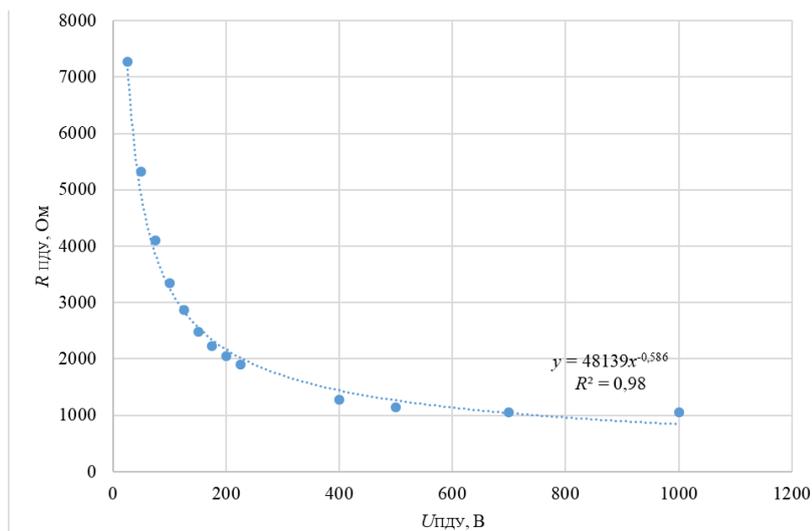


Рисунок 5 – Зависимость ПДУ активного сопротивление тела от ПДУ напряжения прикосновения при аварийном режиме работы электроустановок [13]

Обсуждение. В статье рассмотрены особенности воздействия постоянного электрического тока на персонал. В настоящее время традиционно проводится раздельный расчёт отдельных факторов риска травмирования персонала. Работа выполнена на основе существующих стандартов и научных публикаций, посвящённых оценке воздействия электрического тока на организм человека. Проанализированы аналогичные исследования о действии электрического тока на персонал, обслуживающий электроустановки постоянного тока. Наиболее близкими исследованиями являются работы [10; 21].

Во многих работах подчёркивается важность учёта одновременного влияния напряжения и тока на состояние организма человека. В данной статье предложена новая формула для оценки количества энергии постоянного тока, поглощённого телом человека, основанная на совместном учёте факторов риска производственной среды. Впервые разработаны графики и математические модели, позволяющие прогнозировать динамику изменения этих факторов во времени.

Выводы. Полученные данные о поглощённой телом человека энергии постоянного тока можно использовать в качестве характеристики для совместной оценки напряжения прикосновения, тока и времени (продолжительности) воздействия этих факторов на персонал. Предложенный метод позволяет моделировать поглощённую телом человека энергию постоянного тока в зависимости от продолжительности воздействия. Его можно принять за основу при проведении теоретических исследований, рассматриваемых опасных производственных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Петров О.П. Производственный травматизм на предприятиях энергетики // Молодой ученый. 2020. № 16 (306). С. 158-160. EDN: GPRCBY.

2. Виноградов А.В., Хименко А.В., Лансберг А.А. Анализ несчастных случаев в электросетевых компаниях // Агроинженерия. 2024. Т. 26. № 2. С. 78–85. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-78-85>. EDN: NSPOBM.

3. Matusевич V.M. Analysis of industrial injuries at energy enterprises and ways to reduce it // Collection of scientific papers of the Angarsk State Technical University. 2021. No. 1. P. 193-201. URL: <https://angtu.editorum.ru/ru/nauka/article/44795/view>.

4. Sarsenbekova M. Analysis of industrial injuries in the energy sector // Proceedings of the International scientific-theoretical conference "Seifullin Readings – 15: Youth, Science, Technology – New Ideas and Prospects", dedicated to the 12th anniversary of S. Seifullin. 2019. V. II, Part 1. P. 240-243. URL: <https://kazatu.edu.kz/assets/i/science/sf15-energo-126.pdf>.

5. Thor M.E. Classification of working conditions by the class of working conditions according to the severity of the work process for electricians of JSC DRSK // Forum of young scientists. 2019. No. 6 (34). P. 1183-1189. URL: https://www.forum-nauka.ru/_files/ugd/b06fdc_bc08acfd9b87484199f4e86c4a3f40ab.pdf.

6. Petrov O.P. Industrial injuries at energy enterprises // Young scientist. 2020. No. 16 (306). P. 158-160. URL: <https://moluch.ru/archive/306/68913/>.

7. Moiseyenko K.A. Occupational injuries in the electric power industry // Collection of works of the X All-Russian scientific and practical conference for students and young people "Progressive technologies and economics in mechanical engineering". 2019. P. 134-136. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/53089>.

8. Габдрахим Л.Р., Сарсенов А.Е. Пути повышения безопасности труда работающих на предприятиях электроэнергетической отрасли промышленности. Современные научные исследования и инновации. 2021. № 3 (119). С. 8. EDN: XHIZUC. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2021/03/94743>.

9. Анализ травматизма с летальным исходом за 2020-2024 г. [Электронный ресурс] URL: <http://szap.gosnadzor.ru/>.

10. Пазуха А.А. Совершенствование безопасности персонала энергетического комплекса безопасности от электрического травмирования развитием и внедрением технических средств. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2021. 226 с.

11. Перечень случаев травматизма дистанций электроснабжения Свердловской железной дороги за период с 1966 по 2022 год. Екатеринбург: ОАО «РЖД», 2022. 57 с.

12. ГОСТ Р 70646.1–2023. Воздействие электрического тока на людей и домашних животных. Часть 1. Общие аспекты 2023. 58с.

13. ГОСТ Р 12.1.038–2024. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. 2024. 15 с.

14. ГОСТ Р 70646.2–2023 Воздействие электрического

тока на людей и домашних животных. Часть 2. Специальные аспекты 2023. 42с.

15. ГОСТ 12.1.038–82 Система стандартов безопасности труда. ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. 1983. 10 с.

16. Sadeghi-Yarandi M., Torabi-Goudarzi S., Asadi N., Golmohammadpour H., Ahmadi-Moshiran V., Taheri M., et.al. Development of a novel Electrical Industry Safety Risk Index (EISRI) in the electricity power distribution industry based on fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) // Heliyon. 2023. Vol. 9. Iss. 2. P. e13155. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13155>.

17. Floyd H.L. Through the Lens of System Safety: The Limitations of a Compliance-Based Safety Culture and Opportunities to Reduce Electrical Injuries // IEEE Industry Applications Magazine. 2023. Vol. 30. No. 3. P. 12–17. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2023.3328504>.

18. Защита от поражения электрическим током. Общие положения для электроустановок и электрооборудования. ГОСТ Р 58698-2019 (МЭК 61140:2016). [Электронный ресурс] URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=436478>.

19. Средства защиты от поражения электрическим током. [Электронный ресурс] URL: <https://ipo5.ru/press-center/article/sredstva-zashchity-ot-porazheniya-elektricheskim-tokom/>.

20. Никифорова Е.А., Киселева Е.А. Оценка эффективности мероприятий, направленных на улучшение условий труда работников // Проблемы безопасности российского общества. 2022. № 1 (37). С. 59-64. EDN: SCSTCE.

21. Пазуха А.А. Повышение уровня электробезопасности на контактной сети за счет создания новых знаков безопасности труда // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. № 2(46). С. 103-109.

Статья поступила в редакцию 27.10.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК: 504.3.054:656.1

EDN: SPHCUL

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, СВЯЗАННЫХ С
ТРАНСПОРТОМ, НА ПЕРЕКРЕСТКАХ БИШКЕКА**

SPIN: 4592-4380

AuthorID: 869228

АЛСЕИТОВ Мирлан Тилегенович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой Автомобильного транспорта
Кыргызско-Российский Славянский университет имени Б.Н. Ельцина
(Кыргызская Республика, 720000, г. Бишкек, Киевская ул., 44, e-mail: alseitov80@mail.ru)

SPIN: 1449-6732

AuthorID: 1232788

ORCID: 0000-0001-9623-057X

ScopusID: 58419740600

ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор,
профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)

SPIN: 9964-2034

AuthorID: 439213

ORCID: 0000-0002-5914-6210

ScopusID: 57220085642

ЧУСОВ Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: chusov17@mail.ru)

Аннотация. В статье представлены результаты пространственного моделирования выбросов загрязняющих веществ, связанных с транспортными потоками, на десяти ключевых перекрестках города Бишкек. Математическая модель разработана на основе методологии CORINAIR (EEA, 2019) и учитывает интенсивность движения, категорию транспортных средств, скорость потока, метеорологические условия и поправочные коэффициенты режима работы двигателя. Для пространственной аппроксимации применён метод взвешенного обратного расстояния (*IDW*), обеспечивающий построение непрерывного поля загрязнения. Рассчитанные значения интегрального индекса загрязнения S_j варьировали от 0,11 до 0,89, что свидетельствует о значительном различии между периферийными и центральными зонами города. Максимальные уровни выбросов зафиксированы на перекрестках Шабдан Баатыра – Лермонтова, Анкара – Ауэзова и Боконбаева – Ю. Абдрахманова, на долю которых приходится свыше 50% совокупных транспортных выбросов. Пространственная интерполяция выявила выраженную ось загрязнения запад-восток, совпадающую с направлением главных магистралей («Чуй», «Жибек-Жолу»). Результаты моделирования могут быть использованы при разработке программ по управлению качеством воздуха, экологическому мониторингу и планированию городской транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: транспортное загрязнение, моделирование выбросов, математическая модель, пространственный анализ, интерполяция *IDW*, качество атмосферного воздуха, городская экология

**SPATIAL ANALYSIS OF TRANSPORT-RELATED POLLUTANTS
AT THE INTERSECTIONS OF BISHKEK**

© The Author(s) 2025

ALSEITOV Mirlan Tilegenovich, candidate of technical sciences, docent,
head of the Department of Automobile Transport
Kyrgyz-Russian Slavic University named after B. N. Yeltsin
(Kyrgyz Republic, 720000, Bishkek, st. Kievskaya, 44, e-mail: alseitov80@mail.ru)

POLITAEVA Natalia Anatolyevna, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Construction
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: politaevana1971@gmail.com)

CHUSOV Alexander Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent,
docent of the Higher School of Hydraulic Engineering and Energy Construction
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Russia, 195251, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: chusov17@mail.ru)

Abstract. This article presents the results of spatial modeling of pollutant emissions associated with traffic flows

at ten key intersections in the city of Bishkek. The mathematical model was developed based on the CORINAIR methodology (EEA, 2019) and takes into account traffic intensity, vehicle category, flow velocity, meteorological conditions, and engine operation correction coefficients. The inverse distance weighting (IDW) method was applied for spatial approximation, enabling the construction of a continuous pollution field. The calculated values of the integrated pollution index (S_i) ranged from 0,11 to 0,89, indicating a significant difference between peripheral and central urban zones. The highest emission levels were recorded at the intersections of Shabdan Baatyr – Lermontov, Ankara – Auezov, and Bokonbaev – Y. Abdrakhmanov Streets, which together accounted for over 50% of total traffic emissions. Spatial interpolation revealed a distinct west–east pollution axis that corresponds to the direction of the main urban highways (“Chui” and “Zhibek-Zholu”). The modeling results can be used in the development of air quality management programs, environmental monitoring, and urban transport infrastructure planning.

Keywords: traffic pollution, emission modeling, mathematical model, spatial analysis, IDW interpolation, air quality, urban ecology.

Для цитирования: Алseitов М.Т. Пространственный анализ загрязняющих веществ, связанных с транспортом, на перекрестках Бишкека / М.Т. Алseitов, Н.А. Политаева, А.Н. Чусов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 208-213. – EDN: SPHCUL.

Введение. Загрязнение атмосферного воздуха в городах Центральной Азии в последние десятилетия стало одной из ключевых экологических проблем, напрямую связанных с ростом автомобилизации и низким уровнем экологических стандартов транспортной инфраструктуры [1]. По данным Всемирной организации здравоохранения, транспортный сектор является доминирующим источником выбросов оксида углерода (CO), диоксида азота (NO_2) и твёрдых частиц мелкой дисперсности (PM2.5) в крупных городах [2].

Для Бишкека эта проблема особенно актуальна в связи с высокой плотностью транспортных потоков в городе, пересечением магистральных улиц и устаревшим автопарком, что в совокупности приводит к росту концентраций загрязняющих веществ [3]. Актуальные исследования подтверждают значительный вклад транспортных выбросов в формирование загрязнения воздуха в городах, особенно вблизи интенсивных магистралей и перекрёстков. Выбросы от интенсивных магистралей существенно увеличивают концентрации PM2.5 и NO_2 в зоне до 200-300 м от дороги, при этом вклад транспорта в прирост PM2.5 вблизи дорог может достигать 23% от фоновых значений [4, 5]. Наиболее высокие концентрации NO_2 и PM2.5 фиксируются в часы пик, особенно в местах ускорения и скопления транспорта, таких как перекрёстки и участки с пробками [6, 7]. Пространственная изменчивость загрязнителей может быть значительной даже на масштабе 10-100 м, что требует применения мобильного мониторинга и высокоточных моделей [8].

Современные методы включают гибридные модели, объединяющие геостатистику и машинное обучение (например, *SPDE*, *CNN*, *Random Forest*), что позволяет с высокой точностью выявлять «горячие точки» и прогнозировать концентрации PM2.5 и NO_2 в районах плотной застройки [8, 9]. Использование данных дистанционного зондирования и пространственной регрессии расширяет возможности анализа загрязнителей на уровне мегаполисов и выявления вкладов различных источников [10, 11].

Вклад транспорта в выбросы CO и NO_2 в крупных городах может превышать 40-55% от общегородских уровней, особенно в периоды интенсивного движения [12]. При этом вклад транспорта в PM2.5 ниже (5-14%), что связано с особенностями осаждения частиц и влиянием других источников (промышленность, вторичные процессы) [13]. Важную роль играют типы транспорта: больший вклад вносят грузовые и дизельные автомобили [14].

Распределение загрязнителей определяется не только интенсивностью движения, но и метеорологическими условиями (ветер, осадки, высота слоя смешения), а также особенностями городской застройки [15]. Перенос загрязнителей может приводить к их накоплению в удалённых от дорог районах.

Моделирование и мониторинг на уровне перекрёстков позволяют выявлять «горячие точки» загрязнения, связанные с транспортными потоками, особенностями застройки и метеорологическими условиями. Например, исследования с использованием мобильного мониторинга, *CFD*-моделирования и машинного обучения показали, что концентрации PM2.5 и NO_2 существенно возрастают именно вблизи перекрёстков и транспортных коридоров [16, 17]. Аналогичные подходы успешно применялись в городах с разной плотностью и структурой застройки, что подтверждает их универсальность и возможность переноса на условия Бишкека [18, 19].

Таким образом, существующие исследования подтверждают, что пространственный анализ на уровне перекрёстков является оправданным методом для выявления локальных зон риска, что делает данный подход релевантным для условий Бишкека.

Методология. Цели и задачи исследования. Целью данного исследования являлся пространственный анализ выбросов транспортного происхождения (CO , NO_2 , PM2.5) на перекрёстках Бишкека с использованием расчётных данных и методик пространственной агрегации.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

1. Собрать и систематизировать расчётные дан-

ные о выбросах на 10 ключевых перекрёстках города Бишкек.

2. Определить вклад каждого перекрёстка в совокупный объём выбросов.

3. Построить графики распределения загрязнителей и сводную таблицу полученных результатов.

4. Сравнить полученные результаты с данными, представленными в мировом научном сообществе.

Для получения корректных результатов исследования были использованы следующие методы:

– сравнительный анализ для определения долей каждого перекрёстка в совокупных выбросах;

– статистическая обработка для нормализации данных и вычисления процентных долей;

– визуализация для построения сравнительных графиков (CO , NO_2 , $PM_{2.5}$, S) и сводной таблицы.

В качестве объекта исследования выбраны десять перекрёстков Бишкека и пригорода (с. Новопокровка), характеризующихся различной транспортной нагрузкой. В выборку вошли следующие узлы: Шабдан Баатыра-Лермонтова, Анкара-Ауэзова, Боконбаева-Ю. Абдрахманова, Московская-Ю. Абдрахманова, Ауэзова-Чуй, Жибек-Жолу-Тоголок-Молдо, Токтогула-Ю. Абдрахманова, Жибек-Жолу-Манаса, Ден Сяопина-Интергельпо, Новопокровка (Ленина-Кирова). Для каждого перекрёстка были получены данные о валовых выбросах трёх загрязнителей: CO , NO_2 и $PM_{2.5}$. Расчёты основаны на учёте интенсивности транспортных потоков, средней скорости движения и показателей выбросов по категориям автомобилей.

Интегральный показатель загрязнения S определялся по формуле:

$$S = CO + NO_2 + PM_{2.5} \quad (1)$$

где CO – валовые выбросы оксида углерода, т/год,

NO_2 – валовые выбросы диоксида азота, т/год,

$PM_{2.5}$ – валовые выбросы твёрдых частиц мелкой дисперсности, т/год.

Радиационный теплообмен (тепловое излучение) связан с двойным преобразованием энергии и происходит в три этапа:

Оценка выбросов загрязняющих веществ от транспортных потоков выполнена с использованием математической модели, основанной на методологии *CORINAIR* (EEA, 2019) и адаптированной под локальные условия Бишкека. Модель учитывает интенсивность движения, категорию транспортных средств, скорость потока и поправочные коэффициенты, отражающие режимы движения и климатические особенности.

Совокупные выбросы загрязняющего вещества на перекрёстке определялись выражением:

$$E_{ij} = \sum_{k=1}^n (N_{kj} \cdot L_{kj} \cdot EF_{ik} \cdot \alpha_{kj} \cdot \beta_{kj}) \quad (2)$$

где E_{ij} – валовый выброс вещества i (CO , NO_2 , $PM_{2.5}$) на перекрёстке j , т/год,

N_{kj} – количество транспортных средств категории k , проходящих через перекрёсток j , ед./год,

L_{kj} – длина участка, проходящая через перекрёсток,

км,

EF_{ik} – эмиссионный фактор загрязняющего вещества i для категории k , г/км,

α_{kj} – коэффициент режима движения (учёт ускорения, торможения, холостого хода),

β_{kj} – поправочный коэффициент на внешние условия (температура, дорожное покрытие, уклон).

Для оценки интегральной нагрузки загрязнения в пределах каждого перекрёстка введён обобщённый индекс загрязнения S_j :

$$S_j = w_1 \frac{E_{CO,j}}{E_{CO,max}} + w_2 \frac{E_{NO_2,j}}{E_{NO_2,max}} + w_3 \frac{E_{PM_{2.5},j}}{E_{PM_{2.5},max}} \quad (3)$$

где w_1 , w_2 , w_3 – весовые коэффициенты токсикологической значимости загрязнителей, $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,35$, $w_3 = 0,25$.

Полученные значения S_j нормированы в диапазоне $[0;1]$ и использовались для ранжирования перекрёстков по степени экологической нагрузки.

Для пространственного отображения распределения загрязнения воздуха применялся метод взвешенного обратного расстояния (*IDW*), позволяющий построить непрерывное поле концентраций:

$$Z(x, y) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{S_j}{d_j^p}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{d_j^p}} \quad (4)$$

где $Z(x, y)$ – расчётное значение интегрального индекса загрязнения в точке (x, y) ,

d_j – расстояние от точки интерполяции до перекрёстка j ,

p – степень взвешивания (в данной работе принято $p = 2$).

Данный метод обеспечивает плавную аппроксимацию между точками наблюдений, позволяя визуализировать «горячие зоны» загрязнения воздуха в городской среде. Доля вклада каждого перекрёстка в совокупный уровень загрязнения определялась по формуле:

$$F_j = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^n S_j} \times 100\% \quad (5)$$

Результаты. Рассчитанные валовые выбросы (CO , NO_2 , $PM_{2.5}$) и их сумма по десяти исследованным перекрёсткам Бишкека приведены в таблице 1.

Графическое представление результатов показаны на рисунках 1-4.

Результаты пространственного моделирования позволили количественно оценить распределение транспортных выбросов в пределах городской улично-дорожной сети. Полученные значения интегрального индекса S_j варьировали от 0,11 (пригород Новопокровка) до 0,89 (центральный узел Шабдан Баатыра-Лермонтова), что свидетельствует о резком градиенте загрязнения между периферийными и центральными зонами города.

Наибольшие интегральные показатели ($S > 0,7$) зафиксированы на трёх перекрёстках:

- Шабдан Баатыра-Лермонтова ($S = 0,89$);

- Анкара-Ауэзова ($S = 0,81$);

- Боконбаева-Ю. Абдрахманова ($S = 0,72$).

Таблица 1 – Вклад перекрестков Бишкека в суммарные выбросы транспортных загрязнителей

Пересечение	CO (т/год)	NO ₂ (т/год)	PM2.5 (т/год)	S (т/год)	Среднее
Шабдан Баатыра-Лермонтова	21,474	22,925	0,626	45,025	18,87
Анкара-Ауэзова	28,168	12,034	0,473	40,675	17,05
Боконбаева-Ю. Абдрахманова	27,295	8,125	0,313	35,732	14,97
Московская-Ю. Абдрахманова	22,835	7,368	0,321	30,524	12,79
Ауэзова-Чуй	13,904	10,285	0,576	24,765	10,38
Жибек-Жолу-Тоголок-Молдо	11,090	4,595	0,174	15,859	6,65

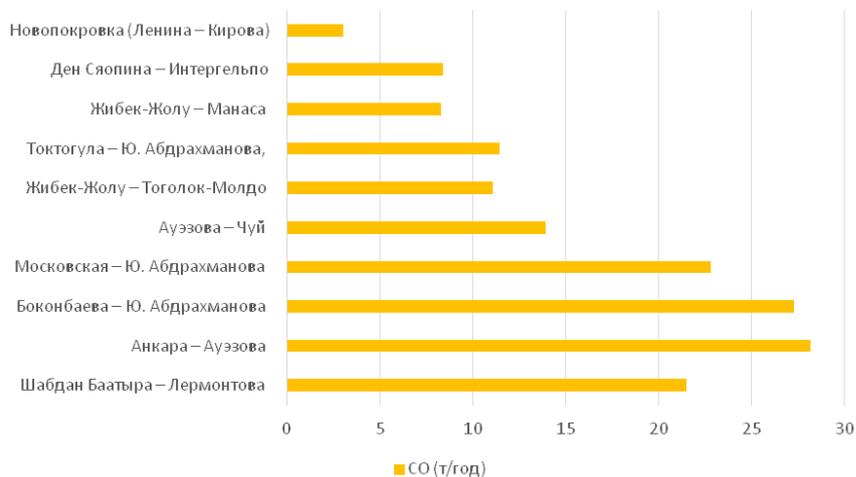


Рисунок 1 – Распределение выбросов CO по перекресткам

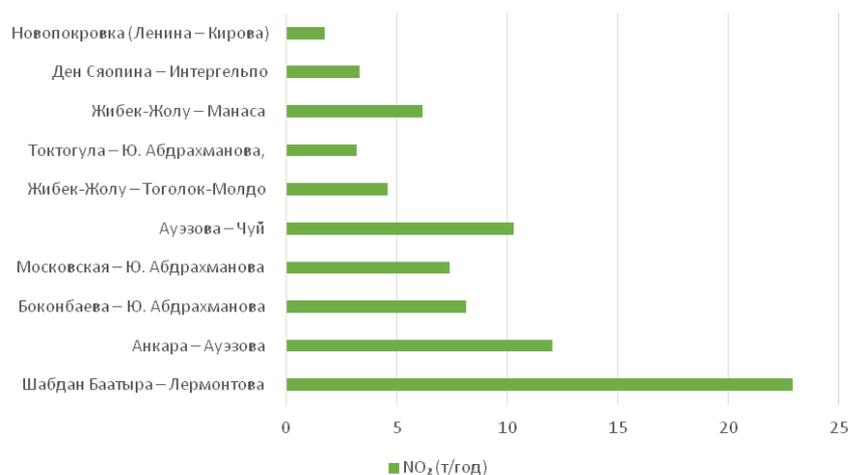


Рисунок 2 – Распределение выбросов NO₂ по перекресткам

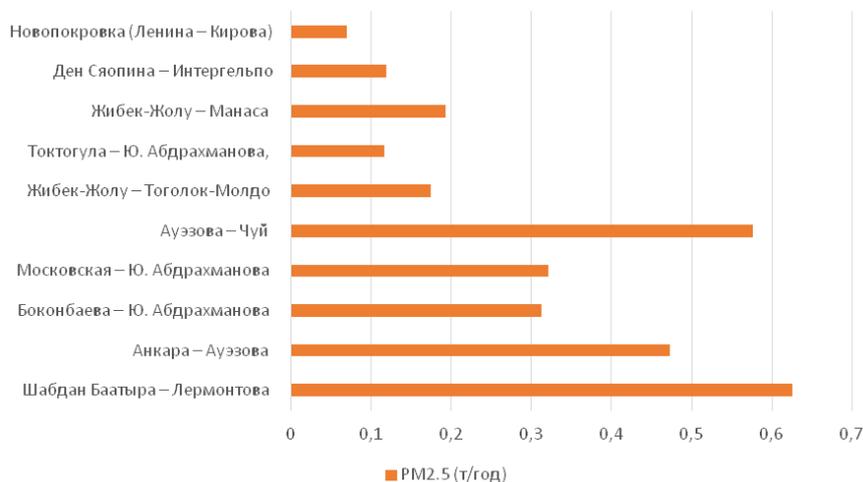


Рисунок 3 – Распределение выбросов PM2.5 по перекресткам

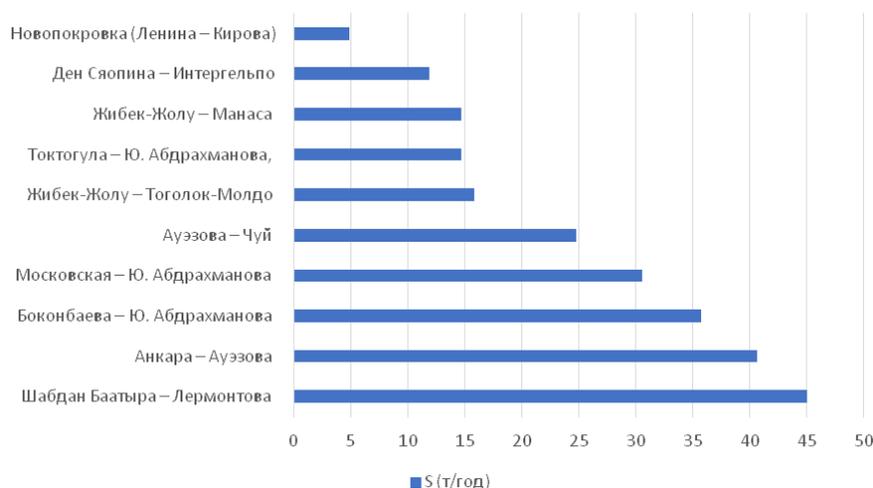


Рисунок 4 – Совокупные выбросы (S) по перекресткам

Эти точки формируют зону максимальной концентрации выбросов, соответствующую центральным артериям Бишкека с интенсивностью движения до 30 000 авт./сут.

Средний уровень загрязнения ($S=0,45-0,60$) наблюдается на перекрестках Московская-Абдрахманова и Ауэзова-Чуй, характеризующихся смешанным транспортным потоком и частыми остановками. Минимальные уровни загрязнения ($S<0,25$) характерны для периферийных зон-Новопокровка и Ден Сяопина-Интергельпо, где доля легкового транспорта превышает 90%.

Пространственная интерполяция (*IDW*) выявила вытянутую полосу повышенных концентраций вдоль оси запад-восток, совпадающую с направлением основных магистралей («Чуй», «Жибек-Жолу»). Максимальные значения $Z(x,y) > 0,8$ приходятся на плотную уличную сеть центра города.

Обсуждение. Международные исследования подтверждают, что перекрестки с высокой интенсивностью движения большегрузных дизельных автомобилей – основные локальные источники транспортных выбросов. Перекрестки с интенсивным движением большегрузных дизельных автомобилей формируют «горячие точки» загрязнения $PM_{2.5}$, NO_2 , CO и чёрного углерода. Вблизи таких перекрестков концентрации $PM_{2.5}$ могут превышать среднеродские уровни на 40-60% [20-22]. Вклад тяжёлых дизельных транспортных средств в выбросы на перекрестках может достигать 70-90% по отдельным загрязнителям, несмотря на их меньшую долю в общем потоке транспорта [23-25]. Пиковые значения NO_2 и $PM_{2.5}$ фиксируются в часы пик и при скоплении грузового транспорта, что подтверждено как в городах США, Китае, так и в других мегаполисах [26]. Гибридные методы пространственного анализа (мобильный мониторинг, моделирование, машинное обучение) позволяют точно выявлять локальные зоны загрязнения и подтверждают совпадение «горячих точек» с перегруженными перекрестками [27].

Разработанная модель отличается от существующих эмпирических подходов тем, что объединяет:

- факторную структуру расчёта эмиссий (по категориям транспорта и режимам движения);
- нормированную оценку токсикологического вклада загрязнителей;
- пространственную интерполяцию для выявления локальных «горячих точек».

Такой подход обеспечивает возможность геоинформационного ранжирования перекрестков и может быть применён при разработке программ по управлению качеством воздуха и транспортному планированию в других городах Центральной Азии.

Выводы. В результате проведенного исследования была разработана математическая модель выбросов загрязняющих веществ, связанных с транспортными потоками, на десяти ключевых перекрестках города Бишкек. Модель разработана на основе методологии *CORINAIR* (EEA, 2019) и учитывает интенсивность движения, категорию транспортных средств, скорость потока, метеорологические условия и поправочные коэффициенты режима работы двигателя. Полученные результаты моделирования согласуются с выводами других исследователей, изучавших вопросы загрязняющих выбросов от автомобильного транспорта.

Таким образом, исследование подтверждает важность пространственного подхода к оценке транспортных выбросов и открывает перспективы для внедрения: локальных мер управления трафиком; экологических инициатив (введение обязательного государственного технического осмотра для всех видов транспортных средств); систем оптимизации общественного транспорта.

Работа выполнена по гос. заданию «Научно-методическое и ресурсное обеспечение мероприятий по повышению эффективности деятельности российских национальных (славянских) университетов в Республике Армения, Беларусь, Кыргызстан и Таджикистан по подготовке кадров для цифровой экономики в том числе с использованием современных дистанционных технологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Alseitov, M. Determining the levels of pollution in the territories of Bishkek city with harmful substances from motor transport and combustion products during heating // BIO Web Conf. IV International Conference on Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture (EESTE2024). – 2025. – V. 160. – P. 71-77.
2. WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization (режим доступа: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>, дата обращения: 01.11.2025).
3. Seinfeld, J.H., & Pandis, S.N. (2020). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change (3rd ed.). Wiley.
4. Askariyeh, M. Traffic contribution to PM_{2.5} increment in the near-road environment / M. Askariyeh, J. Zietsman, R. Autenrieth // Atmospheric Environment. – 2020. – V. 224. – P. 117113.
5. Mukherjee, A. Influence of roadway emissions on near-road PM_{2.5}: Monitoring data analysis and implications / A. Mukherjee, M. McCarthy, S. Brown, S. Huang, K. Landsberg, D. Eisinger // Transportation Research Part D-transport and Environment. – 2020. – V. 86. – P. 102442.
6. Bakirci, M. Evaluating the impact of unmanned aerial vehicles (UAVs) on air quality management in smart cities: A comprehensive analysis of transportation-related pollution // Computers and Electrical Engineering. – 2024. – V. 119. – P. 109556.
7. Beckwith, M. NO₂ hotspots: Are we measuring in the right places? / M. Beckwith, E. Bates, A. Gillah, N. Carlsaw // Atmospheric Environment: X. – 2019. – V. 2(12). – P. 100025.
8. Xu, J. Modeling spatial variation of gaseous air pollutants and particulate matters in a Metropolitan area using mobile monitoring data / J. Xu, W. Yang, Z. Bai, R. Zhang, J. Zheng, M. Wang, T. Zhu // Environmental research. – 2022. – V. 210. – P. 112858.
9. Johnson, D.P. A Novel Hybrid Approach: Integrating Bayesian SPDE and Deep Learning for Enhanced Spatiotemporal Modeling of PM_{2.5} Concentrations in Urban Airsheds for Sustainable Climate Action and Public Health / D.P. Johnson, N. Ravi, G. Filippelli, A. Heintzelman // Sustainability. – 2024. – V. 16(23). – P. 10206.
10. Guo, B. Identifying the spatiotemporal dynamic of PM_{2.5} concentrations at multiple scales using geographically and temporally weighted regression model across China during 2015-2018 / B. Guo, X. Wang, L. Pei, Y. Su, D. Zhang, Y. Wang // The Science of the total environment. – 2021. – V. 751. – P. 141765.
11. Filonchik, M. Analysis of Air Pollution from Vehicle Emissions for the Contiguous United States / M. Filonchik, M.P. Peterson // Journal of Geovisualization and Spatial Analysis. – 2024. – V. 8. – P. 16.
12. He, J. Development of a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution based on NRT traffic data and its impact on air pollution in Beijing – Part 2: Impact of vehicle emission on urban air quality / J. He, L. Wu, H. Mao, H. Liu, B. Jing, Y. Yu, P. Ren, C. Feng, X. Liu // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2016. – V. 16. – P. 3171-3184.
13. Qiang, W. Revisiting the impact of vehicle emissions and other contributors to air pollution in urban built-up areas: A dynamic spatial econometric analysis / W. Qiang, H. Lee, Z. Lin, D. Wong // The Science of the total environment. – 2020. – V. 740. – P. 140098.
14. Dabek-Zlotorzynska, E. Characteristics and sources of PM_{2.5} and reactive gases near roadways in two metropolitan areas in Canada / E. Dabek-Zlotorzynska, V. Celso, L. Ding, D. Herod, C. Jeong, G. Evans, N. Hilker // Atmospheric Environment. – 2019. – V. 218. – P. 116980.
15. Veratti, G. Urban population exposure forecast system to predict NO₂ impact by a building-resolving multi-scale model approach / G. Veratti, A. Lupascu, T. Butler, G. Ghermandi // Atmospheric Environment. – 2021. – V. 261. – P. 118566.
16. Sun, D.J. Simulation and assessment of traffic pollutant dispersion at an urban signalized intersection using multiple platforms / D.G. Sun, S. Wu, S. Shen, T. Xu // Atmospheric Pollution Research. – 2021. – V. 12(7). – P. 101087.
17. Liu, Y. Spatial distribution of air pollutants in different urban functional zones based on mobile monitoring and CFD simulation / Y. Liu, C. Miao, A. Cui, D. Wang // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2024. – V. 22. – P. 11045-11058.
18. Jiang, F. Environmental Justice in the 15-Minute City: Assessing Air Pollution Exposure Inequalities Through Machine Learning and Spatial Network Analysis / F. Jiang, J. Ma // Smart Cities. – 2025. – V. 8(2). – P. 53.
19. Sorek-Hamer, M. A Deep Learning Approach for Meter-Scale Air Quality Estimation in Urban Environments Using Very High-Spatial-Resolution Satellite Imagery / M. Sorek-Hamer, M. Von Pohle, A. Sahasrabhojane, A. Asanjan, E. Deardorff, E. Suel, V. Lingenfelter, K. Das, N. Oza, M. Ezzati, M. Brauer // Atmosphere. – 2022. – V. 13(5). – P. 696.
20. Jeong, C. Temporal and spatial variability of traffic-related PM_{2.5} sources: Comparison of exhaust and non-exhaust emissions / C. Jeong, J. Wang, N. Hilker, J. Deboz, U. Sofowote, Y. Su, M. Noble, R. Healy, T. Munoz, E. Dabek-Zlotorzynska, V. Celso, L. White, C. Audette, D. Herod, G. Evans // Atmospheric Environment. – 2019. – V. 198. – P. 55-69.
21. Wang, Z. Investigation of the spatiotemporal variation and influencing factors on fine particulate matter and carbon monoxide concentrations near a road intersection / Z. Wang, Q. Lu, H. He, D. Wang, Y. Gao, Z. Peng // Frontiers of Earth Science. – 2017. – V. 11. – P. 63-75.
22. Targino, A. Hotspots of black carbon and PM_{2.5} in an urban area and relationships to traffic characteristics / A. Targino, M. Gibson, P. Krecl, M. Rodrigues, M. Santos, M. De Paula Corrêa // Environmental pollution. – 2019. – V. 218. – P. 475-486.
23. He, W. Simulation-Based Environmental Risk Analysis of Mixed Traffic Flow at Intersections / W. He, L. Wang, Ch. Xu // ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering. – 2022. – V. 8(4). <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0001264>
24. Ma, T. In-use NO_x and black carbon emissions from heavy-duty freight diesel vehicles and near-zero emissions natural gas vehicles in California's San Joaquin Air Basin / T. Ma, C. Li, J. Luo, C. Frederickson, T. Tang, T. Durbin, K. Johnson, G. Karavalakis // The Science of the total environment. – 2023. – V. 907(10). – P. 168188.
25. Yang, D. High-resolution mapping of vehicle emissions of atmospheric pollutants based on large-scale, real-world traffic datasets / D. Yang, S. Zhang, T. Niu, Y. Wang, H. Xu, K. Zhang, Y. Wu // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2019. – V. 907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168188>.
26. Cheng, S. A high-resolution emissions inventory and its spatiotemporal pattern variations for heavy-duty diesel trucks in Beijing, China / S. Cheng, F. Lu, P. Peng // Journal of Cleaner Production. – 2020. – V. 250. – P. 119445.
27. Fan, J. Emission impacts of left-turn lane on light-heavy-duty mixed traffic in signalized intersections: Optimization and empirical analysis / J. Fan, A. Li, A. Ilahi, K. Gao // Heliyon. – 2023. – V. 9(5). – P. e16260.

Статья поступила в редакцию 13.11.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025

УДК 661.18 : 504.06

EDN: TDULIK

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

© Авторы 2025

SPIN: 6255-9509

AuthorID: 893206

ORCID: 0000-0002-1623-734X

ScopusID: 57210982869

КОШЕЛЕВ Алексей Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

*ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии»
(111024, Россия, г. Москва, ш. Энтузиастов, 23, e-mail: koshelevsarator@gmail.com)*

SPIN: 7673-8480

AuthorID: 182520

ORCID: 0000-0001-6030-7344

ResearcherID: V-2374-2019

ScopusID: 7006674945

ТИХОМИРОВА Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор,

заведующая кафедрой «Экология и техносферная безопасность»

Института урбанистики, архитектуры и строительства

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

(440054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail: tichomirova_ei@mail.ru)

SPIN: 5784-9118

AuthorID: 763271

ORCID: 0000-0002-3220-031X

ResearcherID: ABF-3360-2020

ScopusID: 10041650500

АТАМАНОВА Ольга Викторовна, доктор технических наук,

профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность»

Института урбанистики, архитектуры и строительства

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

(440054, Россия, Саратов, улица Политехническая, 77, e-mail: O_V_Atamanova@mail.ru)

SPIN: 4549-0533

AuthorID: 1305712

ORCID: 0000-0002-7563-4150

АЛЕКСАШИН Антон Вячеславович, начальник отдела охраны труда

БПО Филиала АО «Транснефть-Приволга» Саратовское районное нефтепроводное управление.

(440009, Россия, Саратов, улица Луговая, д. 118, e-mail: ant-aleksashin@yandex.ru)

Аннотация. В настоящее время на территории Российской Федерации зарегистрировано 1147 объектов накопленного вреда окружающей среде, причем более 84 % из них являются закрытыми объектами размещения и обезвреживания твердых коммунальных отходов. Установлено, что в среднем накопленные отходы на одном объекте имеют объем порядка 618 тыс. куб. м, а площадь загрязненная твердыми коммунальными отходами в среднем составляет 128 тыс. кв. м. Загрязняющие грунт вещества на территории таких объектов, в большинстве своем, включают цинк, медь, свинец, мышьяк, бенз(а)пирен и др. поллютанты. Цель исследований - разработка концепции реабилитации полигонов твердых коммунальных отходов, основанной на использовании технологий выделения и обезвреживания свалочного грунта с дальнейшим переводом обезвреженного свалочного грунта в потенциально плодородный грунт. Полученный грунт отвечает требованиям, предъявляемым к потенциально плодородным грунтам, что дает возможность его применения для рекультивационных мероприятий на организуемом полигоне.

Ключевые слова: полигон твердых коммунальных отходов, объект накопленного вреда окружающей среде, обезвреживание, выщелачивание, утилизация, грунт потенциально плодородный, гуминовые препараты.

MODERN TECHNOLOGICAL SOLUTIONS TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE LIQUIDATION OF SOLID MUNICIPAL WASTE LANDFILLS

© Authors 2025

KOSHELEV Alexey Vasilievich, candidate of technical sciences, senior researcher, senior researcher state

Research Institute of Organic Chemistry and Technology

(111024, Russia, Moscow, Entuziastov highway, 23, e-mail: koshelevsarator@gmail.com)

TIKHOMIROVA Elena Ivanovna, doctor of biological sciences, professor,
head of "Ecology and Technosphere Safety" department

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
(410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya st., 77, e-mail: tichomirova_ei@mail.ru)

ATAMANOVA Olga Viktorovna, doctor of technical sciences, professor of "Ecology and Technosphere Safety"
department Institute of Urbanism, Architecture and Construction

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
(410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya st., 77, e-mail: O_V_Atamanova@mail.ru)

ALEKSASHIN Anton Vyacheslavovich, head of the Occupational Safety Department
BPO Branch of JSC Transneft-Volga Region Saratov Regional Oil Pipeline Administration.
(440009, Russia, Saratov, Lugovaya Street, 118, e-mail: srnu@sar.sam.transneft.ru)

Abstract. Currently, 1147 objects of accumulated environmental damage are registered in the Russian Federation. More than 84% of them are closed solid municipal waste placement and disposal facilities. The average volume of accumulated waste at one facility is 618.3 thousand cubic meters. The average area of waste contamination is 128.22 thousand square meters, and the soils at solid municipal waste placement facilities are contaminated, for the most part, with cadmium, lead, arsenic, benz(a)pyrene and other pollutants. The objective of the research is to develop a concept for the liquidation of municipal solid waste landfills based on the use of technologies for the separation and neutralization of landfill soil, followed by disposal by converting it into "potentially fertile soil" with the addition, if necessary, of humic preparations and aluminosilicate adsorbents. Obtaining a substrate that meets the characteristics of potentially fertile soil allows its use in the reclamation of the landfill territory.

Keywords: solid municipal waste landfill, object of accumulated environmental damage, neutralization, leaching, disposal, potentially fertile soil, humic preparations.

Для цитирования: Кошелев А.В. Современные технологические решения для обеспечения экологической безопасности при ликвидации полигонов твердых коммунальных отходов / А.В. Кошелев, Е.И. Тихомирова, О.В. Атаманова, А.В. Алексахин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 4(72). – С. 214-222. – EDN: TDULIK.

Введение. Современная проблема утилизации производственных и коммунальных отходов для обезвреживания объектов накопленного вреда окружающей среде (ОНВОС) становится в настоящее время в нашей стране все более актуальной [1-2]. Известно [3], что количество имеющихся на территории Российской Федерации производственных и коммунальных отходов на текущий момент достигает 30 миллиардов тонн. В прошедшем 2024 г. масса производственных и потребительских отходов, которые были направлены на хранение, превысила 5390 млн. тонн, что почти на 30% больше, чем в 2023 г. Утилизированные и обезвреженные производственные и коммунальные отходы в 2024 г. составили в общем объеме 3080 млн. тонн. Кроме того за период с 2016 г. по 2024 г. прослеживается четкая тенденция увеличения объемов образования отходов производства и потребления. В Российской Федерации разработан и реализуется в действии государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде (ГРОНВОС). В настоящее время (июль 2025 г.) в ГРОНВОС внесено 1147 ОНВОС, причем более 84% из них относятся к закрытым объектам размещения и обезвреживания твердых коммунальных отходов (ТКО) [5]. ОНВОС, которые зарегистрированы в ГРОНВОС, требуют обеспечения ликвидации накопленного вреда окружающей среде.

Как показывают результаты инвентаризации ОНВОС, объекты размещения и обезвреживания ТКО содержат главным образом отходы III-V клас-

сов опасности. Результаты мониторинга было установлено, что в среднем территория под одним полигоном ТКО составляет около 130 тыс. м², а отходы на каждом таком полигоне достигают объема до 620 тыс. м³. К основным загрязняющим веществам полигонов ТКО относятся: свинец, мышьяк, кадмий, цинк, медь, бенз(а)пирен (свыше 30% случаев) и др. поллютанты [6]. Расчеты показали [6], что обезвреживание и рекультивация одного гектара площади такого полигона ТКО потребует в среднем финансовых затрат от 25 тыс. руб. до 68 тыс. руб.

Цель исследований состоит в создании концепции реабилитации объектов накопления ТКО. В основу предлагаемой концепции положена технология преобразования свалочного грунта в процессе обезвреживания в потенциально плодородный грунт (ППГ). При этом анализируются варианты получения ППГ с добавлением сорбентов на основе алюмосиликатов, а также гуминовых препаратов.

Поскольку транспортная доставка незагрязненного грунта на объект рекультивации требует обычно значительных денежных затрат и времени, производство ППГ на месте объекта рекультивации является особенно предпочтительным. Известно, что для создания плодородного слоя толщиной до 30 см на рекультивируемой территории площадью в один гектар необходимо завезти порядка 3 тыс. тонн почвы. Это вполне обосновывает целесообразность получения ППГ на территории самого объекта рекультивации полигона ТКО.

Нормативная документация [7-9] предъявляет ряд

требований к ППГ в соответствии с их основными свойствами (факторами):

1) *F1* представляет гранулометрический состав. *F1* показывает содержание (%) в грунте частиц разной крупности по фракциям от общей массы грунта. Частиц грунта фракцией мельче 0,01 мм должно присутствовать в общей массе от 10 до 75%. Частиц грунта фракцией крупнее 300 мм должно присутствовать в общей массе менее 10%.

2) *F2* – загрязнение грунта химическое. *F2* представляет попадание в почву загрязняющих химических веществ, нарушающий ее естественный состав. Химическое загрязнение присутствует, если концентрация поллютанта в ней выше предельно допустимой концентрации (ПДК) этого вещества.

3) *F3* представляет емкость катионного обмена, которая в соответствии с нормативом должна быть

более 15,0 мг-экв/100 г.

4) *F4* – Присутствие гумуса. Должно составлять более 0%.

5) *F5* представляет класс опасности, который для ППГ должен быть 5 классом.

Отходы, поступающие на полигоны ТКО, в значительной степени состоят из органических компонентов, которые в процессе химико-биологических процессов превращаются в газ, воду и растворимые в ней вещества, твердый субстрат (свалочный грунт) [10].

В таблице 1 приведен материальный баланс на 1 кг отхода по органической части, составляющей 75% от общего, а также время их разложения по литературным данным [10-12]. Неорганические вещества (в основном, строительный мусор с грунтом) в отходах составляют около 25%.

Таблица 1 – Материальный баланс на 1 кг ТКО и время разложения углеродсодержащих компонентов, размещенного на полигоне захоронения

Компонент ТКО	Биогаз, %	Свалочный грунт, %	Растворимые вещества, %	Всего, кг	Время разложения, год
Макулатура	49,20	21,72	29,08	0,27	0,4 - 14
Дерево	24,29	18,0	57,71	0,04	до 50
Текстиль	51,84	17,74	30,42	0,06	0,1 - 30
Кожа	58,84	15,24	25,92	0,01	25 - 40
Резина	45,47	10,68	43,85	0,02	до 1000
Пленки	35,39	12,01	52,6	0,05	10 - 30
Твердый пластик	35,39	11,93	52,68	0,07	до 1000
Пищевые отходы	54,76	20,40	24,84	0,23	0,5 - 14
ИТОГО:	47,75	18,92	33,33	0,75	

Анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод, что за 30-50 лет около 35% от массы захороненных ТКО переходят в газообразные вещества, 25% – в воду и водорастворимые вещества, около 15% – в свалочный грунт.

По нормативным требованиям обустройства полигона ТКО [13] два метра (по высоте) уплотненного отхода при складировании на полигоне засыпается изолирующим грунтом толщиной 0,25 м. Плотность отходов (исходная) – около 0,2 кг/м³, после уплотнения – 0,4-0,5 кг/м³. Тогда содержание грунта, изолирующего в содержимом полигона по массе, может составить 25-40%. С учетом процессов компостирования органической части отходов и удаления газообразной и жидкой составляющих, доля свалочного и изолирующего грунта возрастает до 60-80% от массы всего содержимого полигона, что делает актуальной задачу анализа образуемого субстрата и возможного перевода его в ППГ. При чем ППГ должен отвечать каждому из приведенных выше свойств (факторов) – *F1*÷*F5* [7, 9].

Методология. Технология преобразования свалочного грунта в ППГ предполагает, прежде всего, в соответствии с требованиями факторов *F2* и *F5*, очистку и обезвреживание его от различных загрязняющих веществ. Основные способы очистки, применяемые на практике [14-17]: термическое обезвреживание (ТО) отходов, выщелачивание (экст-

рагирование), фиторемедиация. ТО эффективно для очистки отходов от органических поллютантов – пестицидов, нефти и нефтепродуктов, бенз(а)пирена, полихлорированных бифенилов и т.п. Выщелачивание – экстрагирование загрязнителей специально подобранными растворителями, используется, в основном, для очистки от тяжелых металлов. Фиторемедиация применяется для очистки почв от поллютантов при небольших (до 10 ПДК) уровнях загрязнений.

Термическое обезвреживание отходов представляет собой технологический процесс переработки отходов в высокотемпературных условиях для обезвреживания отходов от токсичных органических загрязняющих веществ [14]. Реализованный авторами эксперимент по термическому обезвреживанию загрязненного пестицидами грунта позволил установить минимальную температуру, способствующую переходу загрязненного грунта в инертный грунт 5 класса опасности. Эта температура составила 750°С.

Однако термическое обезвреживание отходов не в полной мере отвечает требованиям, о которых говорилось выше, и ухудшает соответствие ППГ свойств (факторов) грунта *F1*, *F3* и *F4*. Данное утверждение можно объяснить происходящим при термическом обезвреживании окислением органики почв до CO_2 и H_2O , а также слипанием (объедине-

нием) мелкодисперсных частиц глинистых грунтов при достаточно высоких температурах среды.

Применение термических способов при обезвреживании отходов способствуют возникновению не только экономических, но и экологических проблем, оказывая прямое негативное воздействие на окружающую среду.

Переработка и обезвреживание значительной части ТКО методом сжигания осуществляется на соответствующих предприятиях – мусоросжигаю-

щих заводах (МСЗ) только в богатых странах мира (табл. 2) [18]. Термический метод позволяет обезвреживать высокотоксичные отходы с максимальной производительностью [19-20]. Например, установка фирмы «Крефельд» (Германия) имеет два агрегата производительностью по 240 тонн в сутки, российская установка СФ-369.01 производства «Уралхиммаш» – 90 т/сутки [21]. Однако термические установки дороги, в частности, за счет сложной системы очистки отходящих в атмосферу газов [22].

Таблица 2 – Доля сжигания ТКО в странах мира и России [19]

Страна	Население, млн чел.	ТКО, млн. т в год	Количество МСЗ	Доля сжигаемых ТКО, %
Швейцария	7	5,1	29	79
Япония	123	44,5	1900	72
Дания	5	3,7	32	65
Швеция	9	3,9	21	59
Франция	56	28,6	100	41
Нидерланды	15	7,9	9	39
Германия	61	37,7	51	33
Италия	58	28,3	51	17
США	248	180,0	168	16
Испания	38	16,5	21	6
Великобритания	57	27,4	7	5
Россия	146	56,5	10	2,4

Основные экологические аспекты, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду и здоровье людей в результате ТО отходов, включают:

- выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и сбросы в гидросферу, содержание и концентрация которых напрямую зависит от видов отходов, которые при этом обезвреживаются;

- значительный расход энергоресурсов, также зависящий от разновидности обезвреживаемых отходов.

Особую важность имеет проблема очистки стоков при обработке газообразных продуктов горения [22]. В этих случаях сточная вода обычно содержит не только механические примеси, но и соли, образующиеся в результате реакции нейтрализации, тяжелые металлы, диоксины и диоксиноподобные соединения [21].

Важную роль в реализации предлагаемой технологии играли гуминовые препараты, которые заменяли использование гумуса в почве. Была предложена технология гумусирования грунта, которая не сложна в исполнении и не требует значительных финансовых вложений [9, 23]. Используемые в данной технологии гуминовые препараты можно получить омылением бурого окисленного угля или торфа.

Исследования показали, что в составе гуминовых препаратов, так же как и в составе гумуса присутствуют не только гуминовые кислоты, но и фульвовые кислоты – низкомолекулярные органические соединения с высокой биодоступностью, представляющие собой сополимеры гуминовых кислот.

Гуминовые кислоты представляют собой комплекс высокомолекулярных органических веществ,

включая карбоксильные соединения, метоксильные соединения, гидроксигруппы соединений и др. Типы взаимодействия различных групп в составе гуминовых кислот приведены в таблице 3.

Именно эти группы обеспечивают основные функции гуминовых кислот в биосфере [24].

Таблица 3 – Возможные типы взаимодействия структурных групп гуминовых кислот

Структурная группа	Тип взаимодействия
-COO ⁻ - H ⁺	Катионный обмен
N ⁺ (R) ₄ - OH ⁻	Анионный обмен
CAg - OH	Комплексообразование
= C = O	Окисление-восстановление
- C ₆ H ₅	Донорно-акцепторное
- (CH ₂) _n -	Гидрофобные взаимодействия

Особое внимание необходимо было уделить процессу повышения емкости катионного обмена.

Емкость катионного обмена (ЕКО) – фактор F3, повышается при добавлении в свалочный грунт гуминовых препаратов и алюмосиликатов. В таблице 4 отражены значения ЕКО (мг-экв/100 г) для отдельных видов грунтов и минераллов [25, 26]. Высокая обменная емкость, небольшая дисперсность, а также невысокая стоимость позволили выделить бентониты и глаукониты в разряд предпочтительных мелиорантов.

Важную роль в составе предлагаемой технологии играет также процесс выщелачивания грунтов.

Были проведены экспериментальные исследования процесса выщелачивания (извлечения) из техногенного грунта ионов Cu²⁺, Zn²⁺, Pb⁴⁺. Ионы

тяжелых металлов (ТМ) извлекались раствором HNO_3 . Тип грунта – суглинок. Принятый к исследованиям грунт изначально содержал 654 мг/кг свинца (IV), 291 мг/кг меди (II) и 320 мг/кг цинка (II).

Таблица 4 – Катионообменные емкости некоторых почв, минералов и гуминовых веществ

Тип	Вещество	ЕКО, мг-экв/100 г
Алюмосиликаты	Песчаный грунт	1 - 5
	Глауконит	до 50
	Бентонит	до 150
Гуминовые вещества	Чернозем	20 - 60
	Гумус почв	40 - 300
	Гуминовые кислоты	до 900
	Фульвокислоты	до 700

При проведении экспериментальных исследований необходимо было определить минимальную концентрацию азотной кислоты в воде, применяемой как раствор-выщелачиватель.

Процесс выщелачивания в статическом режиме выполняли следующим образом: 10 г техногенного грунта помещали в мерный стакан и заливали 100 мл раствора HNO_3 заданной концентрации на сутки. При этом раствор аккуратно перемешивали каждый час.

Процесс выщелачивания в динамическом режиме

осуществлялся следующим образом. Техногенный грунт массой 200 г размещался на мелкой сетке в цилиндрической делительной воронке. Далее раствор HNO_3 в объеме 2 л (ДВ2) или 4 л (ДВ4) фильтровался через грунт со скоростью 0,6÷1,2 л/ч.

Обезвреживание свалочного грунта было также экспериментально исследовано с использованием метода фиторемедиации. Основным объектом исследования при этом являлся свалочный грунт, который был отобран из свалочных масс промышленных и бытовых отходов путем сепарации. Указанные отходы размещаются в Шуваловской промышленной зоне на территории г. Нижнего Новгорода. Основной вид отходов представляет собой отходы строительных материалов.

Схема предложенного способа получения ППГ из свалочных масс представлена на рисунке 1. На первой стадии свалочные массы сепарируются на грохотах (ситах) с выделением мелкодисперсной фракции (мельче 30 мм) – свалочного грунта. Далее грунт смешивается с гуминовыми препаратами (ГП). Полученный ППГ проходит стадию фиторемедиации с выращиванием специально подобранных зеленых насаждений на биологическом этапе рекультивации (БР).

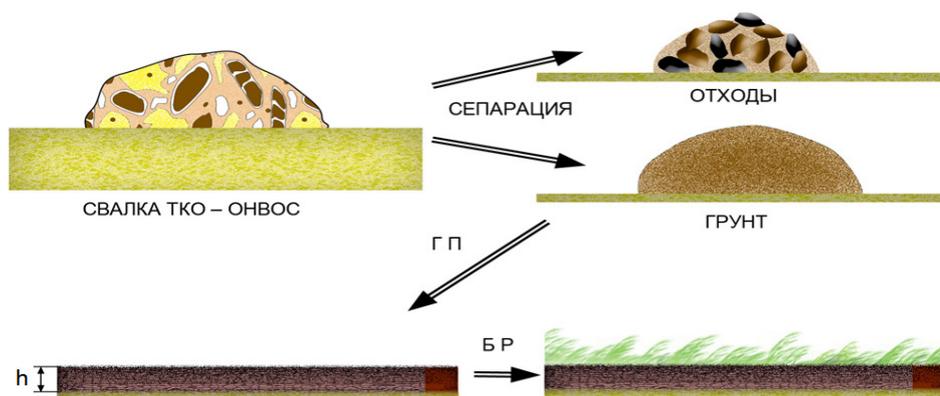


Рисунок 1 – Схема получения потенциально плодородного грунта из свалочных масс. Пояснения в тексте

Экспериментальная работа выполнена на примере выделенного свалочного грунта после сепарации из свалочных масс. Отбор грунта на территории техногенного объекта выполнялся в 8-и точках. При чем глубина отбора проб варьировалась от 0,2 м до 10 м. В качестве фоновой точки была выбрана точка за пределами обследуемого полигона, позволяющая сравнить показатели грунта на глубинах от 0 м до 0,05 м и от 0,05 м до 0,2 м в фоновой точке с техногенным грунтом, отобранном в контрольных точках объекта. Таким образом, исследования были проведены на 26 пробах техногенного грунта, которые сравнивались с двумя фоновыми пробами.

Усредненная проба техногенного грунта позволила изготовить 8 образцов для анализов. Семь из этих проб, смешивались с раствором гумта калия и раствором гексагидрата дихлорида магния

($MgCl_2 \cdot 6H_2O$). Гексагидрат дихлорида магния – природный бактерицид и антисептик. Концентрат $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (28%) и концентрат калиевых солей гуминовой кислоты (32 г/дм³) были приняты за 100%. Таким образом, из этих составляющих приготавливались 1,5% водного слабощелочного раствора калиевых солей гуминовой кислоты (0,5 г/дм³) и 10% водного слабокислого раствора гексагидрата дихлорида магния (26 г/дм³).

Результаты. Экспериментальные исследования по выщелачиванию ТМ разбавленным раствором HNO_3 из грунта были проведены на ионах Pb^{4+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} . При реализации процесса выщелачивания в статическом режиме и разных концентрациях HNO_3 получены значения концентраций ионов Pb^{4+} в растворе-выщелачивателе, представленные в таблице 5. Из данной таблицы видно, что увели-

чение концентрации HNO_3 , не оказывает существенного влияния на изменение количества ионов Pb^{4+} в растворе. Аналогичный эксперимент по выщелачиванию был проведен и для соединений железа (II). Ионы Fe^{2+} в результате реакции с HNO_3 , окислялись до ионов Fe^{3+} , окрашивая при этом раствор в желто-бурый цвет. К тому же разрушение структуры глинистых минералов, которые входят в состав грунта, предопределяет существенное уменьшение массы образцов.

Процесс выщелачивания в динамическом режиме в результате фильтрования 2 л 1%-го раствора HNO_3 через 200 г техногенного грунта дало возможность сократить уменьшение массы до 1%. Однако в указанном случае уменьшается эффективность очистки техногенного грунта (табл. 6).

При увеличении используемого раствора HNO_3 в объеме с 2 л до 4 л, результаты извлечения

ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{4+} после фильтрования вполне сопоставимы с результатами выщелачивания в статическом режиме (табл. 6).

Использование процесса выщелачивания ионов Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{4+} в динамическом режиме позволило извлечь из техногенного грунта порядка 90% указанных поллютантов. Это дает основание утверждать, что предложенный метод является перспективным для получения из техногенного грунта ППГ.

Далее был определен класс опасности образцов изучаемого техногенного грунта, декорированного растворами гексагидрата дихлорида магния и калиевых солей гуминовой кислоты. В таблице 7 приводятся результаты использования $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ и гумата калия для минимизации токсичности исходно-техногенного грунта до V класса опасности, что дает возможность перевести его в разряд грунтов-рекультивантов.

Таблица 5 – Концентрация свинца и железа в растворе-выщелачивателе и изменение массы образца

Содержание HNO_3 в водном растворе, %	Концентрация ионов Pb^{4+} в растворе, мг/дм ³	Концентрация ионов Fe^{2+} в растворе, мг/дм ³	Изменение массы образца, %
1	68,3±6,5	38,4±3,3	5,1±0,8
5	71,0±5,8	8215,0±339,0	12,3±1,1
10	73,2±6,0	9030,0±743,0	14,5±1,2

Таблица 6 – Содержание тяжелых металлов в образцах грунта после выщелачивания в статическом (СВ) режиме и динамических режимах (ДВ2 и ДВ4) выщелачивания

Исходное загрязнение грунта ТМ, мг/кг	Содержание ТМ в грунте после СВ, мг/кг	Содержание ТМ в грунте после ДВ2, мг/кг	Содержание ТМ в грунте после ДВ4, мг/кг
655 (Pb)	42,1±1,9	122,0±14,9	62,0±5,6
322 (Zn)	29,0±2,3	69,0±6,2	33,0±3,1
293 (Cu)	30,0±3,2	58,0±4,4	36,0±4,2

Таблица 7 – Класс опасности обработанных образцов свалочного грунта

Компоненты смеси	Номера образцов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Рецептура							
Свалочный грунт, г	100	100	100	100	100	100	100	100
Раствор бишофита, мл	-	3	10	-	-	3	8	10
Раствор гумата калия, мл	-	-	-	3	10	3	8	10
Класс опасности	IV	IV	IV	V	IV	V	V	V

Исследования показали, что самый лучший из полученных результатов (класс опасности отхода V) установлен на образцах 4, 6-8. В указанных образцах пробы техногенного грунта были обработаны раствором гексагидрата дихлорида магния с концентрацией 26 г/дм³ и раствором калиевых солей гуминовой кислоты с концентрацией 0,5 г/дм³, которые были взяты в количестве 3÷10% от массы грунта.

Разработанный способ модифицирования техногенного грунта полигона ТКО или несанкционированной свалки в ППГ защищен патентом РФ на изобретение [27].

Обсуждение. Решение проблемы обеспечения экологической безопасности размещения ТКО в настоящее время требует особого подхода. В качестве одного из решений нами предлагается

реорганизация неорганизованных свалок и существующих полигонов ТКО с учетом обеспечения их повышенной изоляции, а также возможности обработки свалочного тела дезинфектантами и выщелачивающими средствами. Предлагаемый вариант реорганизованного полигона обеспечивает следующие основные технологические процессы: 1) дренаж загрязненных стоков; 2) промывку и выщелачивание свалочного грунта на полигоне; 3) недопущение (минимизация) инфильтрации загрязненных стоков через основание сооружения.

Реорганизация существующего полигона ТКО или неорганизованной свалки предполагает на начальном этапе вертикальную планировку свалочного тела. По внешнему периметру полигона устраивается открытый горизонтальный дренаж, при-

чем боковые откосы и дно траншеи покрывается слоем гидроизоляции (рис. 2). Рядом с местом расположения самой низкой отметки траншеи размещается колодец, соединенный водоводом с траншеей. Колодец системой водоводов соединен с отстойником очистных сооружений. В случаях, когда коэффициент фильтрации местного грунта основания имеет значения $K_{\phi} > 10^{-8}$ м/сут, в основании полигона проводятся специальные противофильтрационные мероприятия.

В соответствии с рассматриваемой схемой противофильтрационные мероприятия включают следующее. Со стороны внутренних откосов траншеи выполняется бурение вглубь основания полигона горизонтальных скважин. Длина таких скважин должна быть не менее половины ширины полигона. Далее проводится нагнетание в пробуренные скважины цементного или гидрофобизирующего раствора. При составлении цементного раствора необходимо придерживаться соотношения цемента к воде в пределах 0,1÷2,0. В верхней части тела полигона ТКО размещается сеть водоводов с перфорацией, через которые обеспечивается его периодическая промывка, причем материал трубопроводов должен быть устойчив к химическим и температурным воздействиям. Насыпь в теле полигона уплотняется, гидроизолируется и покрывается слоем насыпного грунта. Перфорированные водоводы кроме промы-

вок тела полигона также выполняют функцию сбора и отвода свалочного газа, образующегося на объекте. Отбираемый свалочный газ поступает на утилизацию, снижая тем самым экологическую нагрузку на атмосферу. Предлагаемый вариант реорганизации существующих полигонов ТКО и неорганизованных свалок делает возможным применение выщелачивания для обезвреживания свалочного грунта на описанном ОНВОС.

Представленные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать технологическую схему получения ППГ.

По законодательству РФ [7] инертные грунты, образующиеся в результате термической обработки отходов, содержащих органические вещества, пригодны для технической рекультивации при условии покрытия их слоем плодородного грунта или слоем ППГ. Авторами разработана технология перевода инертного грунта в ППГ, включающая 7 последовательных операций (рис. 3).

Операция 1 – при помощи процедуры грохочения из техногенного грунта выделяется фракция размером частиц не более 30 мм. Проводится подтверждение состава выделенной фракции. Проводится расчет требуемого объема глинистого мелкодисперсного грунта для смешивания с подготовленным техногенным грунтом.

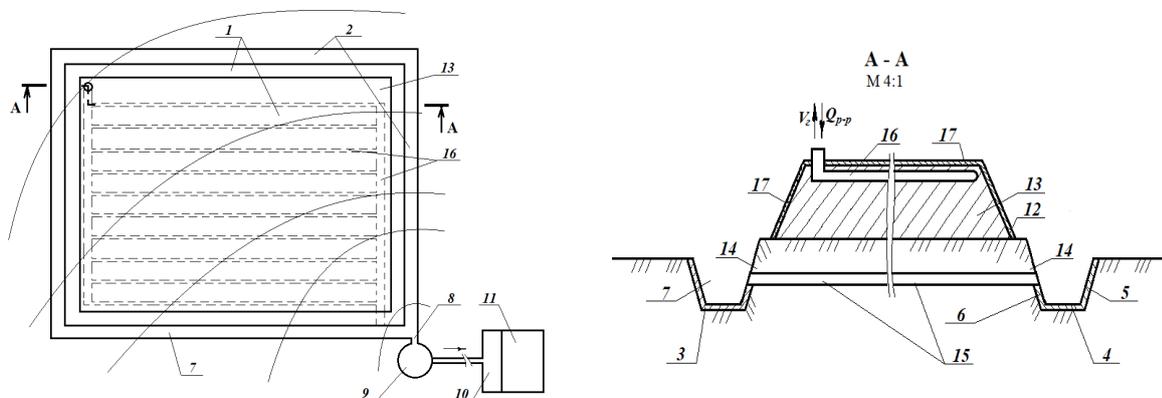


Рисунок 2 – Схематическое изображение объекта рекультивации свалки в полигон ТКО: 1 – свалка; 2 – траншея; 3 – слой гидроизоляции; 4 – дно траншеи; 5 – внешний откос траншеи; 6, 14 – внутренний откос траншеи; 7 – траншея со стороны колодца; 8 – соединительный участок траншеи с колодцем; 9 – колодец; 10 – накопительная емкость; 11 – очистные сооружения; 12 – основание насыпи; 13 – насыпь полигона; 15 – скважина; 16 – водовод; 17 – покрытие тела полигона

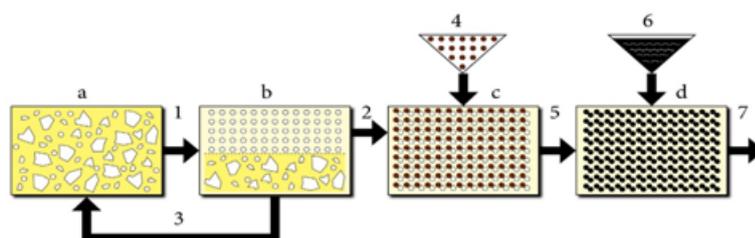


Рисунок 3 – Технология получения ППГ: а – техногенный грунт; б – разделенный грунт; в – грунт требуемой фракции; г – ППГ

Операции 2 и 4 – мелкодисперсный глинистый грунт подается при помощи дозатора 4 к подготовленному техногенному грунту и смешивается с ним до получения требуемого объема. Операция 3 – крупные частицы отсепарированной фракции измельчаются и возвращаются к начальному звену технологического процесса. Операции 5 и 6 состоят в следующем: полученный грунт смешивается с ГП, подаваемыми в бункер-смеситель дозатором 6. Объем ГП устанавливается в соответствии с нормативом ЕКО. Операция 7 заключается в отгрузке произведенного ППГ на рекультивируемый объект.

Выводы. Предложена инновационная технология преобразования свалочного грунта в процессе обезвреживания в ППГ, позволившая разработать концепцию реабилитации несанкционированных свалок и полигонов ТКО, как ОНВОС. Преобразование техногенного грунта в ППГ выполняется с учетом его гранулометрического состава, показателей и степени химического загрязнения, значений ЕКО и присутствия в исходном грунте гуматов.

Установлено, что ППГ целесообразно получать путем термообработки исходного свалочного грунта с дополнительным модифицированием его сорбционными материалами на основе алюмосиликатов и ГП.

Проведенные экспериментальные исследования по выщелачиванию ТМ разбавленным раствором азотной кислоты из загрязненного грунта показали, что наиболее эффективным является выщелачивание в динамическом режиме, которое и рекомендуется к использованию в производственных условиях.

Эффективная очистка техногенного свалочного грунта с преобразованием его в ППГ, минимизация в рекультивируемом грунте ТМ и органических поллютантов, требуют научно обоснованного комплекса мероприятий, включающих термическую обработку исходного грунта, его выщелачивание и фиторемедиацию в соответствии с разработанной технологией.

Рассмотренные в статье различные способы ликвидации полигонов захоронения ТКО защищены патентами авторов статьи и вошли в информационно-технический справочник ИТС 53-2025 «Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде» в качестве наилучших доступных технологий [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: [федер. закон: принят Гос. Думой 10.01.2002: по состоянию на 04.08.2023 N 449-ФЗ]. – М.: Собрание законодательства РФ. 2002. № 2, ст. 133.
2. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018. № 84-р. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71767672/?ysclid=me2up0i8xx537842778> (дата обращения: 03.08.2025).
3. Российская Федерация. Указы. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: [указ: утвержден Президентом РФ 19.04.2017

№ 176]. – М.: Собрание законодательства Российской Федерации. 2017. № 17, ст. 2546.

4. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году (проект). – М.: Минприроды России. – 2025. – 721 с.

5. Реестр объектов накопленного вреда окружающей среде РФ 2017-2025 г.г. Режим доступа: <http://vniiecolgy.ru> (дата обращения: 19.06.2025).

6. Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде. ИТС 53-2025. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (проект). – М.: Минпромторг, 2025. – 254 с.

7. ГОСТ 17.5.1.03-86. Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2002. – 6 с.

8. ГОСТ 17.4.1.02.83. Охрана природы. Почва. Классификация химических веществ для контроля загрязнений. – М.: Стандартинформ. – 2023. – 18 с.

9. ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. – М.: Стандартинформ. – 2017. – 22 с.

10. Максимова С.В. Экологические основы освоения территорий закрытых свалок и полигонов захоронения твердых бытовых отходов: автореферат дис. ... доктора технических наук: 03.00.16 / Максимова Светлана Валентиновна. – Пермь, 2004. – 32 с.

11. Армишева Г.Т. Снижение экологической нагрузки при обращении с твердыми бытовыми отходами за счет использования горючих компонентов / Г.Т. Армишева, В.Н. Коротаев, В.Г. Кривошеин // Научные исследования и инновации. – Т. 4. – 2010, № 3. – С. 3-8.

12. Зайцева Т.А. Полигон депонирования твердых бытовых отходов (ТБО) как антропогенная экологическая система / Т.А. Зайцева // Научные исследования и инновации. – Т. 4, 2010. – № 3. – С. 35-43.

13. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов / Утв. Министерством строительства Российской Федерации 2 ноября 1996 г. Режим доступа: <https://base.garant.ru/70731994/?ysclid=me2ubghjue307980159> (дата обращения: 03.08.2025).

14. Жиганков Д.В. Термическое обезвреживание отходов: значение для обеспечения экологической безопасности // Вестник науки. – 2023. – Т. 2. – № 10 (67). – С. 299-303.

15. Кошпик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. – 2014. – № 7. – С. 851-868.

16. Кучное и подземное выщелачивание металлов / под ред. С.Н. Волощука. – М.: Недра. – 1982. – 113 с.

17. Бернадинер М.Н., Бернадинер И.М. Высокотемпературная переработка и обезвреживание жидких, пастообразных и твердых промышленных и медицинских отходов // Экология и промышленность России. – 2011. – № 4. – С. 19-21.

18. Шилкина, С.В. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России / С.В. Шилкина // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2020. – № 1. Режим доступа: <https://resources.today/PDF/05ECOR120.pdf> (дата обращения: 23.06.2020).

19. Бобович Б.Б. Транспортирование, сжигание и захоронение отходов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2011. 340 с.

20. Левин Е.А. Комплексная переработка твердых бытовых отходов. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2019. – 512 с.

21. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления: Справочное издание. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 496 с.

22. Бернадинер М.Н., Бернадинер И.М. Высокотемпературная переработка и обезвреживание жидких, пастообразных и твердых промышленных и медицинских отходов / М.Н. Бернадинер, И.М. Бернадинер // Экология и промышленность России, 2011. – № 4. – С. 19-21.

23. Тихомирова Е.И., Александрин А.В., Кошелев А.В., Атаманова О.В. Разработка технологических решений и способов получения гумино-минеральных композиций для задач рекультивации нефтезагрязненных территорий // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 4. – С.

228-234.

24. Перминова И.В., Жилин Д.М. Гуминовые вещества в контексте зеленой химии // Зеленая химия в России. Сборник статей. – М.: МГУ. – 2004. – С. 146-162.

25. Амфлетт Ч. Неорганические иониты. М.: Мир, 1966. – 188 с.

26. Сухарев Ю.И., Черногорова А.Е., Кувыкина Е.А. Особенности структуры и сорбционно-обменные свойства глауконита // Известия Челябинского научного центра РАН. – 1999. – № 3. – С. 64-68.

27. Кошелев А.В., Желтобрюхов В.Ф., Бойчевский П.Л. и др. Способ ликвидации свалки твердых бытовых отходов // Пат. № 2738420 (РФ). 2020. Заявка № 2020112292 ; заявлено 26.03.2020 ; опубл. 14.12.2020, Бюл. № 35, 2020.

Статья поступила в редакцию 22.09.2025

Статья принята к публикации 16.12.2025