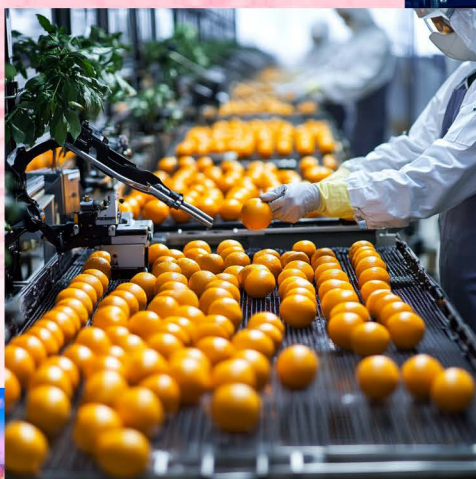


vek21.penzgtu.ru

18+

ISSN 2221-951X

XXI век : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО *плюс*



2025

№2(70) 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:

Авровов Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент
Ефремова Саня Юнусовна, доктор биологических наук, профессор
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент
Пашенко 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
Ивашенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор
Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор
Косников Юрий Николаевич, доктор физико-математических 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
№ 2 (70)
2025

Журнал выходит
4 раза в год

Входит в ПЕРЕЧЕНЬ рецензи-
руемых 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 20.06.2025.

Выход в свет 27.06.2025.

Формат 60X84 1/8

Печать ризография.

Усл. печ. л. 26,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 315.

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:

Авrorов 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*)

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

АДАПТИВНЫЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ММО-СЕТИ ВАНГА И МЕНДЕЛЯ Громов Юрий Юрьевич, Карасев Павел Игоревич, Аль-Судани Зайд Али Хуссейн, Шамсулдин Хайдар Абдулваххаб Х.....	10
КЛИЕНТ-СЕРВЕРНАЯ СТРУКТУРА И ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В СКРИНИНГОВОЙ СИСТЕМЕ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ Бодин Андрей Юрьевич.....	17
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОЙ ПАМЯТИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ БЫСТРОГО УМНОЖЕНИЯ КВАДРАТНЫХ БИНАРНЫХ МАТРИЦ Болгак Алексей Владимирович, Ватутин Эдуард Игоревич.....	27
ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА Шайхулова Айгуль Фазировна.....	35
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ УСПЕВАЕМОСТИ УЧАЩИХСЯ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА К-БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ В ОБЛАСТИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ Мартышкин Алексей Иванович, Синев Михаил Петрович, Митрохина Наталья Юрьевна, Расторгуева Ксения Владимировна.....	43
МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДЕСКРИПТОРОВ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЙ Денисов Александр Анатольевич, Новиков Анатолий Иванович.....	52
ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОМПТ-ИНЖИНИРИНГА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ЭМИССИИ АФФОРДАНСОВ Иващенко Антон Владимирович, Терехин Михаил Александрович.....	61
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСПОЗНАВАНИЮ И АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОДПИСЕЙ: МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ Танцеров Александр Хабибуллоевич, Данилов Евгений Александрович.....	71
ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ С НАСТРОЙКОЙ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ Громов Юрий Юрьевич, Карасев Павел Игоревич, Аль-Судани Зайд Али Хуссейн, Шамсулдин Хайдар Абдулваххаб Х.	77
ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ЛИНЕЙНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ Елинов Дмитрий Александрович, Холкина Виктория Михайловна, Мартышкин Алексей Иванович, Полянскова Екатерина Александровна.....	84
ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОЦЕНКИ СИСТЕМ НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА Прокофьев Олег Владимирович.....	91
МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ ОРГАНИЗАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ ПРОАКТИВНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ Подкин Кирилл Игоревич, Назарова Юлия Александровна, Бойков Антон Алексеевич.....	98
МОНИТОРИНГ И АНАЛИЗ ПРОГРЕССА ОБУЧЕНИЯ В НЕЙРОСИМВОЛЬНЫХ АДАПТИВНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ Зупарова Валентина Владимировна.....	108
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ВЫСКАЗЫВАНИЙ ПО СОДЕРЖАТЕЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ Лось Михаил Александрович.....	115

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИИ ПРОЖИВАНИЯ

Мишина Кристина Дмитриевна, Бодин Олег Николаевич,
Позднякова Татьяна Николаевна, Грудкина Анастасия Алексеевна.....124

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Мерзляков Юрий Владимирович, Трубицков Сергей Владимирович, Аленин Артем Михайлович.....133

ФАЗОВАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ В ПРОГРАММИРУЕМОМ ТАЙМЕРЕ

Чулков Валерий Александрович, Чулков Данила Александрович.....138

ПОДХОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЮЩИХ ОБНОВЛЕНИЯ НЕЗАВИСИМО ОТ МАГАЗИНОВ ПРИЛОЖЕНИЙ

Максимов Ярослав Александрович, Мартышкин Алексей Иванович,
Касаткина Елена Дмитриевна, Панфилова Марина Ивановна.....144

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Охотников Андрей Леонидович, Соколов Сергей Викторович, Костюков Александр Владимирович.....149

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И ИНГРЕДИЕНТОВ

Школьникова Марина Николаевна, Рожнов Евгений Дмитриевич,
Квардин Василий Вячеславович, Паседкина Анна Николаевна.....155

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУКИ ИЗ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА ОВСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧЕНЬЯ

Быченкова Валерия Владимировна, Баженова Ирина Анатольевна,
Чернова Елена Викторовна, Котова Наталья Петровна.....162

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРУДОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРСОНАЛА ШКОЛЬНЫХ СТОЛОВЫХ

Костина Наталья Геннадьевна, Куракин Михаил Сергеевич, Григорьева Роза Завдятовна.....169

ПРИМЕНЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГИДРОЛИЗАТОВ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ПРОБИОТИЧЕСКИХ ДРОЖЖЕЙ *SACCHAROMYCES BOULARDII*

Андреева Анастасия Сергеевна, Бычкова Елена Сергеевна, Арефьева Елизавета Сергеевна.....176

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТВОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Бодрякова Наталия Павловна, Есепенок Константин Викторович, Коноводов Тарас Алексеевич.....184

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СУБСТРАТОВ В АКВАПОНИЧЕСКОЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

Калайда Марина Львовна, Борисова Светлана Дмитриевна.....190

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

СНИЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ НЕФТЯНЫХ ПРОБООТБОРНИКОВ

Богданов Андрей Владимирович, Егоров Максим Александрович, Полунин Георгий Александрович....197

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ РАБОТНИКОВ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: АНАЛИЗ И ПРОФИЛАКТИКА

Ястребинская Анна Викторовна, Едаменко Алена Сергеевна,
Томаровщенко Оксана Николаевна, Канивец Ирина Владимировна.....202

ОРГАНИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ РАБОТНИКОВ РЕМОНТНО-ПУТЕВОГО КОМПЛЕКСА Пименова Юлия Владимировна.....	210
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРОВОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРНОГО РИСКА НА ТЕРРИТОРИЯХ ВБЛИЗИ ВЛ-0,4 КВ Козлова Юлия Сергеевна.....	217
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ В ОЦЕНКЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ ОБРАБОТЧИКОВ РЫБЫ Родионов Никита Владимирович.....	223
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ СЖИЖЕННОГО АЗОТА ПРИМЕНЕНИЕМ МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ПЕН И ПОРОШКОВЫХ СОСТАВОВ Проценко Татьяна Валерьевна, Арзаев Никита Анатольевич, Ивахнюк Григорий Константинович.....	229
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ Пустановалов Илья Андреевич, Фролов Сергей Владимирович, Фролов Денис Васильевич.....	236
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПРОЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА И ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РАСЧЁТА ПОЖАРНОГО РИСКА Шарафутдинов Азат Амирзагитович, Горбачёв Семён Викторович, Балыклов Александр Алексеевич, Шарафутдинова Анжела Азатовна.....	243
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НОРМАТИВНОЙ ОБОСНОВАННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА Палатинская Ирина Петровна, Богданов Андрей Владимирович.....	253
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИХ ПРОЛИВЕ НА ПОЖАРЕ Кузьмин Анатолий Алексеевич, Пермяков Алексей Александрович, Романов Николай Николаевич, Симонова Марина Александровна.....	260
УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IR-ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА Андреев Андрей Викторович, Шавуров Сергей Алексеевич.....	267
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СОРБЕНТ ИЗ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД Таранцева Клара Рустемовна, Багрянцев Александр Александрович, Политаева Наталья Анатольевна.....	272
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Зупарова Валерия Владимировна, Слугинова Наталья Ивановна, Симонова Зоя Александровна.....	279

CONTENT

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING

ADAPTIVE NEURO-FUZZY CLASSIFIER FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF TECHNOLOGY BASED ON WANG AND MENDEL'S MODIFIED FUZZY NEURAL PRODUCTION <i>MIMO</i> NETWORK Gromov Yuri Yuryevich, Karasev Pavel Igorevich, Al-Soudany Zaid Ali Hussein, Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H.	10
CLIENT-SERVER STRUCTURE AND NOISE-IMMUNE DATA TRANSMISSION IN THE SCREENING SYSTEM OF NON-INVASIVE ELECTROCARDIODIAGNOSIS Bodin Andrey Yuryevich.....	17
MATHEMATICAL MODEL AND STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION OF PARALLEL-PIPELINE MEMORY OF A DEVICE FOR FAST MULTIPLICATION OF SQUARE BINARY MATRICES Bolgak Aleksei Vladimirovich, Vatutin Eduard Igorevich.....	27
DIGITAL PRODUCTION FUNCTIONAL MODELLING Shaykhulova Aygul Fazirovna.....	35
DETERMINING THE LEVEL OF STUDENT ACHIEVEMENT BY APPLYING THE <i>K</i>-NEAREST NEIGHBORS METHOD IN MACHINE LEARNING Martyshkin Alexey Ivanovich, Sinev Mikhail Petrovich, Mitrokhina Natalya Yuryevna, Rastorgueva Ksenia Vladimirovna.....	43
METHODS FOR CONSTRUCTING IMAGE KEY POINTS DESCRIPTORS Denisov Aleksandr Anatolievich, Novikov Anatoly Ivanovich.....	52
PROMPT ENGINEERING CREATIVITY SUPPORT BASED ON THE EFFECT OF AFFORDANCE EMISSION Ivaschenko Anton Vladimirovich, Terekhin Michail Aleksandrovich.....	61
MODERN APPROACHES TO SIGNATURE RECOGNITION AND AUTHENTICATION: IMAGE PROCESSING TECHNIQUES Tantserov Alexander Khabibullaevich, Danilov Evgeny Alexandrovich.....	71
A GRADIENT-BASED GENETIC ALGORITHM FOR CONSTRUCTING FUZZY RULES Gromov Yuri Yuryevich, Karasev Pavel Igorevich, Al-Soudany Zaid Ali Hussein, Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H.	77
RESEARCH OF WIND SPEED PREDICTION ACCURACY WITH USING MULTISTAGE LINEAR NEURAL NETWORK Elinov Dmitriy Aleksandrovich, Kholkina Viktoria Mikhailovna, Martyshkin Alexey Ivanovich, Polyanskova Ekaterina Alexandrovna.....	84
PATTERNS OF DEVELOPMENT AND PROSPECTIVE ASSESSMENTS OF SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE Prokofiev Oleg Vladimirovich.....	91
MODEL OF PROJECT MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL DEVELOPMENT BASED ON A PROACTIVE APPROACH TO MANAGEMENT IN AN ENERGY COMPANY Podkin Kirill Igorevich, Nazarova Yulia Aleksandrovna, Boykov Anton Alekseevich.....	98
MONITORING AND ANALYZING LEARNING PROGRESS IN NEUROSymbOLIC ADAPTIVE EDUCATIONAL SYSTEMS Zuparova Valentina Vladimirovna.....	108
DESIGNING THE ARCHITECTURE OF A NEURAL NETWORK MODEL FOR CLASSIFICATION OF USER STATEMENTS BY CONTENT ORIENTATION Los Mikhail Aleksandrovich.....	115

INFORMATION SYSTEM FOR DETERMINING THE ECOLOGICAL WELL-BEING OF A PERSON WITHIN THE TERRITORY OF RESIDENCE Mishina Kristina Dmitrievna, Bodin Oleg Nikolaevich, Pozdnyakova Tatiana Nikolaevna, Grudkina Anastasia Alekseevna.....	124
DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND SOFTWARE FOR CONTROLLING THE ROTARY SUPPORT DEVICE OF THE AUTOMATED MEASURING COMPLEX (AMC) OF ANTENNA MEASUREMENTS Merzlyakov Yuri Vladimirovich, Trubitskov Sergey Vladimirovich, Alenin Artem Mikhailovich.....	133
PHASE INTERPOLATION IN PROGRAMMABLE TIMER Chulkov Valery Alexandrovich, Chulkov Danila Alexandrovich.....	138
THE APPROACH FOR CREATING MOBILE APPLICATIONS RECEIVING THEIR UPDATES INDEPENDENTLY OF APP STORES Maximov Yaroslav Alexandrovich, Martyshkin Alexey Ivanovich, Kasatkina Elena Dmitrievna, Panfilova Marina Ivanovna.....	144
THE CONCEPT OF BUILDING INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS BY UNMANNED RAILWAY TRANSPORT Okhotnikov Andrey Leonidovich, Sokolov Sergey Viktorovich, Kostyukov Alexander Vladimirovich.....	149
FOOD TECHNOLOGY	
EFFECT OF ULTRASONIC EXPOSURE ON FOOD VALUE AND SAFETY OF FOOD PRODUCTS AND INGREDIENTS Shkolnikova Marina Nikolaevna, Rozhnov Evgeniy Dmitrievich, Kvardin Vasily Vyacheslavovich, Pasedkina Anna Nikolaevna.....	155
USING FLOUR FROM GERMINATED OAT GRAIN FOR COOKIE PRODUCTION Bychenkova Valeria Vladimirovna, Bazhenova Irina Anatolyevna, Chernova Elena Victorovna, Kotova Natalia Petrovna.....	162
RESEARCH OF THE STRUCTURE OF LABOR PROCESSES OF SCHOOL CANTENEN STAFF Kostina Natalia Gennadiyevna, Kurakin Mikhail Sergeevich, Grigorieva Roza Zavdyatovna.....	169
APPLICATION OF PLANT HYDROLYSATES FOR THE CULTIVATION OF PROBIOTIC YEAST <i>SACCHAROMYCES BOULARDII</i> Andreeva Anastasia Sergeevna, Bychkova Elena Sergeevna, Arefyeva Elizaveta Sergeevna.....	176
NEW TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE USE OF SECONDARY DAIRY RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF CURD PRODUCTS Bodryakova Nataliya Pavlovna, Esepenok Konstantin Viktorovich, Konovodov Taras Alekseevich.....	184
INVESTIGATION OF SUBSTRATES APPLICATION IN AQUAPONIC RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY Kalaida Marina Lvovna, Borisova Svetlana Dmitrievna.....	190
TECHNOSPHERE SAFETY	
REDUCING THE PROBABILITY OF FIRES BY IMPROVING THE TIGHTNESS OF OIL SAMPLERS Bogdanov Andrey Vladimirovich, Egorov Maxim Aleksandrovich, Polunin Georgy Alexandrovich.....	197
OCCUPATIONAL DISEASES OF WORKERS IN THE MINING INDUSTRY: ANALYSIS AND PREVENTION Yastrebinskaya Anna Viktorovna, Edamenko Alena Sergeevna, Tomarovshchenko Oksana Nikolaevna, Kanivets Irina Vladimirovna.....	202
CATERING FOR EMPLOYEES OF THE REPAIR AND TRACK COMPLEX Pimenova Yulia Vladimirovna.....	210

DETERMINATION OF THE POSSIBILITY OF WIRE CROSS-WHIPPING TO ASSESS THE FIRE RISK ON THE AREAS NEAR OVERHEAD TRANSMISSION LINES 0.4 KV Kozlova Yulia Sergeevna.....	217
USING BAYESIAN NETWORKS TO ASSESS OCCUPATIONAL RISKS OF FISH PROCESSING WORKERS Rodionov Nikita Vladimirovich.....	223
INVESTIGATION OF LIQUEFIED NITROGEN EVAPORATION PROCESSES USING MINERALIZED FOAMS AND POWDER COMPOSITIONS Protsenko Tatyana Valeryevna, Arzaev Nikita Anatolievich, Ivakhnyuk Grigory Konstantinovich.....	229
INVESTIGATION OF THE LOSS OF STRENGTH PROPERTIES OF STRUCTURAL ELEMENTS OF A VERTICAL STEEL TANK FOR STORING PETROLEUM PRODUCTS IN CONDITIONS OF UNSTABLE THERMAL CONDUCTIVITY Pustovalov Ilya Andreevich, Frolov Sergey Vladimirovich, Frolov Denis Vasilyevich.....	236
IMPROVING THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OIL SPILL AREA DURING PROCESS PIPELINE DEPRESSURIZATION AND INCREASING THE RELIABILITY OF FIRE RISK CALCULATIONS Sharafutdinov Azat Amirzagitovich, Gorbachyov Semyon Viktorovich, Balyklov Alexander Alekseyevich, Sharafutdinova Anzhela Azatovna.....	243
ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS AND REGULATORY VALIDITY OF THE USE OF PERSONAL RESPIRATORY PROTECTION EQUIPMENT IN THE CONTEXT OF OCCUPATIONAL SAFETY REQUIREMENTS Palatinskaya Irina Petrovna, Bogdanov Andrey Vladimirovich.....	253
RESEARCH INTO THE PROCESS OF HEAT AND MASS TRANSFER IN WOODEN STRUCTURES WHEN THEY ARE EXPOSED TO FIRE Kuzmin Anatoly Alekseevich, Permyakov Alexey Alexandrovich, Romanov Nikolai Nikolaevich, Simonova Marina Alexandrovna.....	260
HUMAN FACTOR MANAGEMENT USING VR TECHNOLOGIES IN THE LABOR SAFETY SYSTEM Andreev Andrey Viktorovich, Shavurov Sergey Alekseevich.....	267
MODIFIED SORBENT FROM WASTE PULP AND PAPER PRODUCTION FOR RECAPING HEAVY METALS FROM WASTEWATER Tarantseva Klara Rustemovna, Bagryantsev Alexander Alexandrovich, Politayeva Natalya Anatolyevna.....	272
DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION Zuparova Valeria Vladimirovna, Sluginova Natalia Ivanovna, Simonova Zoya Alexandrovna.....	279

УДК 004.032.2

EDN: ABZENE

**АДАПТИВНЫЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ НЕЧЕТКОЙ НЕЙРОННОЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МИМО-СЕТИ ВАНГА И МЕНДЕЛЯ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2852-2633

AuthorID: 185018

ORCID: 0000-0003-3313-2731

ГРОМОВ Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
директор института автоматизации и информационных технологий
Тамбовский государственный технический университет
(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: gromov@yandex.ru)

SPIN: 5033-6943

AuthorID: 865469

ORCID: 0009-0009-3628-6980

КАРАСЕВ Павел Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры КБ-1 «Защита информации»
МИРЭА - Российский технологический университет
(107076, Россия, Москва, улица Строммынка, 20, e-mail: karasev@mirea.ru)

АЛЬ-СУДАНИ Зайд Али Хуссейн, аспирант института автоматизации и информационных технологий
Тамбовский государственный технический университет
(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: alsoudanizaidalin@mail.ru)

ШАМСУЛДИН Хайдар Абдулваххаб Х., аспирант института автоматизации и информационных технологий
Тамбовский государственный технический университет
(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: shamsuldaeenhaidar@mail.ru)

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, полученные в ходе разработки математической модели классификации, предназначенной для комплексной оценки эффективности технологических решений в рамках многокритериального анализа данных. Разработанная модель объединяет методы машинного обучения, включая алгоритмы кластеризации и регрессионного анализа, с экспертно-аналитическими подходами, такими как метод анализа иерархий и сценарное моделирование. Это позволяет проводить ранжирование технологий по ключевым параметрам: экономической целесообразности, технической реализуемости, социально-экологической значимости и потенциалу масштабирования. Валидация модели осуществлялась на основе данных долгосрочных прогнозов научно-технологического развития, включая патентные ландшафты, динамику публикационной активности и сценарные прогнозы. Результаты демонстрируют высокую точность модели в прогнозировании перспективности технологий, что подтверждается сравнением с реальными рыночными трендами. Применение данной модели способствует оптимизации стратегий внедрения инноваций в условиях неопределенности.

Ключевые слова: МИМО-сеть, сети Ванга и Менделя, экспертный анализ, нейро-нечеткий классификатор.

**ADAPTIVE NEURO-FUZZY CLASSIFIER FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS
OF TECHNOLOGY BASED ON WANG AND MENDEL'S MODIFIED FUZZY NEURAL
PRODUCTION MIMO NETWORK**

© The Author(s) 2025

GROMOV Yuri Yuryevich, doctor of technical sciences,
director of the Institute of Automation and Information Security
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya Street, Tambov, 392024, Russia, e-mail: gromovtambov@yandex.ru)

KARASEV Pavel Igorevich, candidate of technical sciences, associate professor,
lecturer of the KB-1 "Information Protection" Department
MIREA - Russian Technological University
(20 Stromynka Street, Moscow, 107076, Russia, e-mail: karasev@mirea.ru)

AL-SOUDANY Zaid Ali Hussein, graduate student
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya Street, Tambov, 392024, Russia, e-mail: alsoudanizaidalin@mail.ru)

SHAMSULDAEEN Haidar Abdulwahhab H., graduate student
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya Street, Tambov, 392024, Russia, e-mail: shamsuldaeenhaidar@mail.ru)

Abstract. The article presents the results of experimental studies obtained in the course of developing a mathematical classification model designed for a comprehensive assessment of the effectiveness of technological solutions within

the framework of multicriteria data analysis. The developed model combines machine learning methods, including clustering and regression analysis algorithms, with expert-analytical approaches, such as the analytic hierarchy process and scenario modeling. This allows ranking technologies by key parameters: economic feasibility, technical feasibility, socio-ecological significance and scalability potential. The model was validated based on long-term forecasts of scientific and technological development, including patent landscapes, publication activity dynamics and scenario forecasts. The results demonstrate high accuracy of the model in forecasting the prospects of technologies, which is confirmed by a comparison with real market trends. The use of this model helps to optimize innovation implementation strategies in the face of uncertainty.

Keywords: MIMO network, Wang and Mendel networks, expert analysis, neuro-fuzzy classifier.

Для цитирования: Громов Ю.Ю. Адаптивный нейро-нечеткий классификатор для оценки эффективности технологии на основе модифицированной нечеткой нейронной производственной MIMO-сети Ванга и Менделя / Ю.Ю. Громов, П.И. Карасев, З.А.Х. Аль-Судани, Х.А.Х. Шамсулдин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 10-16. – EDN: ABZEHE.

Введение. Данное исследование посвящено разработке усовершенствованной архитектуры с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) для адаптивной нечеткой нейронной производственной сети, основываясь на фундаментальной работе Ванга и Менделя. Эта модифицированная структура объединяет алгоритмы нечеткого дерева решений и адаптивные нейро-нечеткие системы вывода (ANFIS) для решения сложных многокритериальных задач экспертного анализа [1-3].

Методология форсайта стала известным подходом к решению многокритериальных задач экспертного анализа данных, позволяющим выявлять технологические прорывы и стратегические траектории научно-технического и инновационного прогресса [4-6]. Как методологическая основа форсайт продолжает развиваться, и за последние два десятилетия были зафиксированы значительные успехи и широкое практическое применение. Обзор литературы демонстрирует эффективность интеграции качественных и количественных методов обработки экспертных данных. Более того, по мере усложнения методологических систем растет потребность в разработке интеллектуальных подходов, способных генерировать научно обоснованные и прозрачные выводы для форсайт-исследований. Цель данного исследования – внести вклад в эту область, предложив модифицированную структуру MIMO для адаптивной нечеткой нейронной производственной сети, используя нечеткие деревья решений и адаптивные алгоритмы нейро-нечеткого вывода для решения многогранных аналитических задач [7].

Методология. Адаптивные нейро-нечеткие классификаторы (ANFC) – это мощные инструменты, используемые для оценки эффективности различных систем и технологий [8-9]. Эти классификаторы сочетают в себе сильные стороны нейронных сетей и нечеткой логики, что позволяет им эффективно решать сложные многокритериальные задачи [10-12].

Из основных особенностей можно выделить следующие:

1. Гибкость – адаптивные нейро-нечеткие классификаторы могут извлекать уроки из данных и подстраиваться под изменяющиеся условия, что

делает их пригодными для работы в динамичных средах.

2. Интерпретируемость – структура ANFC, основанная на правилах, дает представление о процессах принятия решений, помогая понять, как оценивается эффективность.

3. Работа с неопределенностями – нечеткая логика позволяет ANFC управлять неопределенными или неоднозначными данными, что часто встречается в реальных сценариях.

Разработанная Вангом и Менделем сеть MIMO (Multiple Input Multiple Output) представляет собой гибридную нейро-нечеткую архитектуру, предназначенную для оценки эффективности технологий в многокритериальных сценариях принятия решений, таких как выявление стратегических прорывов в научно-техническом развитии [13-15]. Этот фреймворк сочетает нечеткую логику для обработки неопределенности с нейронными сетями для адаптивного обучения, что позволяет эффективно классифицировать и анализировать сложные наборы данных.

Архитектура MIMO обрабатывает множество входных данных (например, стоимость, масштабируемость, инновационный потенциал) и генерирует множество выходных данных (например, показатели эффективности, уровни риска). Позволяет проводить одновременный анализ взаимосвязанных критериев, что имеет решающее значение для форсайт-исследований.

Преимущества MIMO сетей перед традиционными методами:

1. Генерация правил, автоматизированная с помощью нечетких деревьев решений, зависящих от экспертных оценок.

2. Масштабируемость, ограниченная небольшими наборами данных, позволяет обрабатывать данные большой размерности.

3. Инициализация модифицированной нечеткой нейронной производственной MIMO сети Ванга и Менделя.

Рассмотрим набор данных, описывающий многомерные признаки объектов. Пусть каждая строка содержит n числовых значений атрибутов $x_1, x_2, \dots$,

x_n и метку класса C_p , принадлежащую множеству $C = \{C_p, C_2\}$.

Пусть x_{kj} обозначает значение k -й входной переменной для j -го наблюдения; C_j – значение выходной переменной для j -го наблюдения; K – общее количество наблюдений; m – количество входных переменных.

Правило для каждого i формулируется так:

$If(x_1 = L_{1i}) \wedge (x_2 = L_{2i}) \wedge \dots \wedge (x_m = L_{mi}) then (y_i = r_i(1)) \wedge (y_i = r_i(2))$,

где L_{ki} – термин, используемый для оценки k -ого входного параметра.

На рисунке 1 представлена схема разработанного нейро-нечеткого классификатора, реализующего

отображение типа "множественный вход – множественный выход" (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO). Данный модуль решает задачу оценки эффективности технологий, рассматривая их как многомерные объекты, характеризующиеся определенными признаками. Это достигается за счет двухэтапного процесса: (1) применения нечеткого дерева решений для первоначальной оценки и (2) уточнения параметров функции принадлежности и правил вывода с помощью гибридных алгоритмов обучения. Классификатор включает семь уровней, каждый из которых характеризуется конкретными узловыми свойствами и функциональными возможностями.

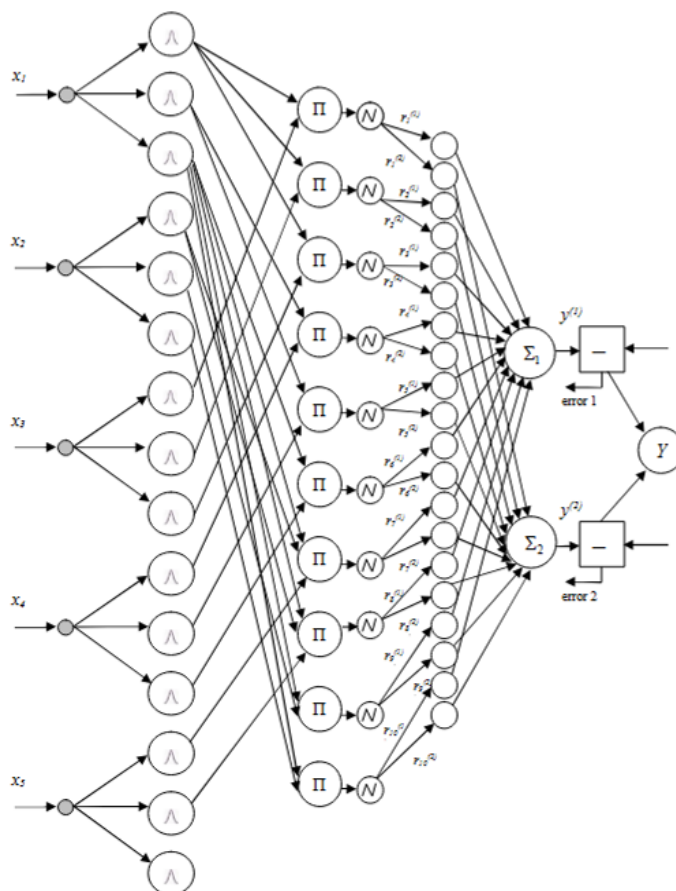


Рисунок 1 – Схема разработанного нейро-нечеткого классификатора, реализующего отображение типа "множественный вход – множественный выход" (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)

Слой 1 (входной слой). Входной слой содержит показатели, которые были идентифицированы и оценены экспертами в соответствующей предметной области как ключевые характеристики, отражающие инновационные технологии. Эти показатели оцениваются на основе их потенциала для решения глобальных проблем, обусловленных критическими кризисами, включая деградацию окружающей среды, продовольственную безопасность, геополитическую нестабильность и энергетическую устойчивость. Узлы этого слоя выполняют функцию передачи точных числовых значений входных атрибутов на последующий слой без изменений.

Слой 2 (слой фаззификации). Этот слой отвечает за преобразование числовых значений входных атрибутов в лингвистические термины. Это преобразование снижает сложность данных и представляет их в формате, более удобном для экспертного анализа. Каждой k -й входной переменной присваивается соответствующий лингвистический термин, обозначаемый как Ak_i , который классифицирует переменную в определенных лингвистических рамках.

Слой 3 (слой агрегирования). Агрегирующий слой выполняет вычисление степени истинности для каждого лингвистического термина, ассоциированного с нечеткими правилами, которые представлены

в виде ветвей дерева решений [16-17]. Данный слой функционирует как неадаптивная система, где нейроны, реализующие логическую операцию И, используются для эмуляции соответствующей логической функции [8]. Нейроны И перемножают функции принадлежности входных переменных, определяя таким образом суммарную степень истинности нечетких правил:

$$w_{ij} = \prod_k \mu_{ki}(x_{kj}) = \prod_k \frac{1}{1 + \left| \frac{x_{kj} - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right|^{2b_{ki}}}, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

Пусть $i \in N$ – индекс, идентифицирующий отдельную продукционную правило ассоциированную с уникальной ветвью в древовидной структуре принятия решений, где в рассматриваемой архитектуре $i = 1, 2, \dots, 10$. Параметр $n \in N$ обозначает кардинальное число продукционных правил в полном ансамбле системы ($n = 10$ в данном частном случае). Узлы четвертого слоя (слой нормализации) обладают статической природой, исключая возможность адаптивной параметризации. Их функциональное назначение заключается в вычислении нормированного коэффициента активации $\bar{w}_i$ для каждого i -го правила относительно j -го входного паттерна. Данный коэффициент отражает относительную значимость активации конкретного правила в контексте полного ансамбля и вычисляется через операцию мягкой нормализации:

$$\bar{w}_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_{ij}} \quad (2)$$

Слой 5 (слой активации). Этот слой включает адаптивные узлы, которые представляют собой листья дерева решений. Каждый узел разделяется на два, что соответствует количеству целевых классов. Слой листьев (выходной слой) в иерархической архитектуре выполняет задачу оценки активации консеквентов продукционных правил для каждого целевого класса. Каждое правило i ассоциировано с адаптивными параметрами $r_{1,i}$ и $r_{2,i}$, представляющими собой классспецифичные коэффициенты влияния, которые параметризуют вклад i -го правила в формирование решений для классов. Инициализация данных весов может осуществляться эвристическими методами, например, на основе алгоритма k -ближайших соседей (k -NN), где веса назначаются пропорционально топологической близости прецедентов в признаковом пространстве. Критически важно отметить, что параметры функций принадлежности в антецедентах и консеквентах инициализируются субоптимальными значениями, полученными на этапе предобработки данных. Эти параметры требуют последующей дифференцируемой оптимизации методами обратного распространения ошибки (*backpropagation*) или стохастического градиентного спуска для минимизации целевой функции потерь. Вычисления производятся по следующей формуле:

$$y_{ij}^{(1)} = \bar{w}_{ij} r_i^{(1)}, y_{ij}^{(2)} = \bar{w}_{ij} r_i^{(2)}, i = 1, \dots, n \quad (3)$$

Уровень 6 (дефаззификация). На этом уровне выполняется консолидация весов истинности вы-

водов каждого правила, чтобы на их основании сформировать функцию принадлежности выходного параметра. Для каждого класса неадаптивные узлы на этом уровне вычисляют значения выходной переменной $y_j^{(1)}$ и $y_j^{(2)}$ которые отражают степень истинности, присваивающую j -му сигналу соответствующий класс. Данные значения определяются как сумма степеней истинности всех правил:

$$y_j^{(1)} = \sum_{i=1}^n y_{ij}^{(1)}, y_j^{(2)} = \sum_{i=1}^n y_{ij}^{(2)} \quad (4)$$

Таким образом, для j -го примера нейроны 6-го слоя реализуют аппроксимацию функции, которую можно записать следующим образом:

$$y_j = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i \prod_k \mu_{ki}(x_{kj}))}{\sum_{i=1}^n (\prod_k \mu_{ki}(x_{kj}))} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \prod_k \frac{1}{1 + \left| \frac{x_{kj} - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right|^{2b_{ki}}}}{\sum_{i=1}^n \prod_k \frac{1}{1 + \left| \frac{x_{kj} - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right|^{2b_{ki}}}} \quad (5)$$

После точной настройки параметров (шаг 2) уровень 7 (выходные данные) вычисляет общую степень достоверности Y_j предсказанного класса l_j j -го сигнала в соответствии с методом правильного модального значения (на основе максимальной степени достоверности):

- выходной сигнал сети $Y_i = \max(y_i^{(1)}, y_i^{(2)});$
- предсказанный класс $C_j = \arg \max_{l=1,2} (y_j^{(l)}).$

Точность нечеткого вывода обеспечивается за счет взаимодействия правил, принадлежащих одному и тому же классу [9].

Результаты. Адаптивная настройка параметров нечеткого нейроклассификатора. Построенная сеть нечетких сигналов, функционирующая на основе прямого распространения сигналов (как показано на рисунке 2), включает пять входных переменных. Каждая из этих переменных была подвергнута фаззификации и представлена в виде трех отдельных лингвистических терминов. Ветви нечеткого дерева решений, связывающие уровень 2 (фаззификация) и уровень 3 (агрегирование), формируют базу правил системы. Каждый узел в слое 3 соответствует одному нечеткому правилу, в результате чего база правил состоит из 10 правил.

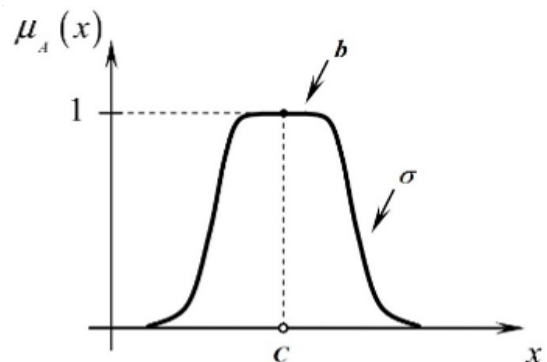


Рисунок 2 – Обобщенная колоколообразная функция принадлежности

Мы предлагаем гибридный алгоритм обучения для настройки параметров центра c_{ki} и ширины d_{ki} колоколообразных функций принадлежности, а также

параметров выводов правил r_i . Алгоритм разделяет параметры на линейные r_i 5-ого слоя и нелинейные c_{ki} и d_{ki} функций принадлежности 2-ого.

На первом этапе для получения значений линейных параметров r_i необходимо решить систему линейных уравнений, причем значения параметров функций – неизменны. При заранее известных значениях функций принадлежности формула (1) для j -го примера представляет собой линейную комбинацию параметров r_i с постоянными коэффициентами $\overline{w}_{ij}$.

$$y_j = \sum_{i=1}^n \overline{w}_{ij} r_i \quad (6)$$

где $\overline{w}_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_{ij}} = \frac{\Pi_k \mu_{ki}(x_{kj})}{\sum_{i=1}^n \Pi_k \mu_{ki}(x_{kj})} = \text{const}$ является нормализованной степенью истинности условий в i -м правиле $i=1, \dots, n$.

Используя P обучающих примеров $(X(j), d_j), j=1, \dots, P$ и подставляя в выходной сигнал целевое значение d_j , мы получаем систему из P линейных уравнений:

$$\begin{cases} \overline{w}_{11} r_1 + \dots + \overline{w}_{n1} r_1 = d_1 \\ \dots \\ \overline{w}_{1P} r_1 + \dots + \overline{w}_{nP} r_1 = d_P \end{cases} \quad (7)$$

который может быть удобно записан в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \overline{w}_{11} & \overline{w}_{21} & \dots & \overline{w}_{n1} \\ \overline{w}_{12} & \overline{w}_{22} & \dots & \overline{w}_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{w}_{1P} & \overline{w}_{2P} & \dots & \overline{w}_{nP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_P \end{bmatrix} \quad (8)$$

В сокращенном виде: $w \cdot r = d$.

Размерность матрицы W равна $P \times n$. Для решения системы предлагаем использовать псевдообратную матрицу, что позволит получить искомый результат за одно действие:

$$r = W^+ d, \quad (9)$$

где W^+ – псевдообратная матрица W .

Псевдообратная матрица W вычисляется с помощью разложения по сингулярным значениям (SVD) с последующим уменьшением ее размерности. Среди широко применяемых методов определения псевдоинверсной матрицы – рекурсивные алгоритмы Гревилла и Фадеева. В данном исследовании мы представляем алгоритм Гревилла в качестве выбранного метода псевдоинверсии матрицы.

Представим, что существует матрица $W \in R^{K \times n}$ и w_k ее k -й столбец, $k=1, \dots, n$.

Пусть W_k – матрица, состоящая из первых k столбцов матрицы W :

$$W_k = [w_1 w_2 \dots w_k] \quad (10)$$

В случае $k=1$: $W_1 = w_1$

В случае $k=2, \dots, n$: $W_k = [W_{k-1} w_k]$.

$W_n = W$.

Матрица $W^+ \in R^{n \times K}$ может быть вычислена с помощью рекурсивного алгоритма.

1. Инициализация:

$$W_1^+ = \begin{cases} 0, \text{ если } w_1 \\ w_1^T / \|w_1\|^2, \text{ иначе} \end{cases} \quad (11)$$

2. В цикле для $k=2, \dots, n$:

$$W_k^+ = \begin{bmatrix} W_{k-1}^+ (I - w_k f_k) \\ f_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

где I – 1-ая матрица порядка K

$$f_k = \begin{cases} \frac{c_k^T}{\|c_k\|^2}, c_k = (I - W_{k-1} W_{k-1}^+) w_k, c_k \neq 0 \\ \frac{w_k^T (W_{k-1}^+)^T w_k}{1 + \|W_{k-1}^+ w_k\|^2}, c_k = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Полученная на последнем шаге матрица W_n^+ является искомой матрицей псевдоинверсии.

На втором этапе, после фиксации значений линейных параметров r_i , вычисляются фактические выходные данные y_i сети для каждой j -й выборки, $j=1, \dots, K$. Для этого расчета мы используем линейную зависимость:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_K \end{bmatrix} = W r \quad (14)$$

Далее мы вычисляем вектор ошибки $\varepsilon = y - d$.

Для обучения необходимо провести оптимизацию дифференцируемой целевой функции, а в частности минимизацию путем использования метода наименьших квадратов.

Сигналы об ошибках распространяются в обратном направлении по взаимосвязанной сети, двигаясь от выхода к входному слою (так называемое обратное распространение ошибок). Этот процесс продолжается до слоя 2, где можно вычислить компоненты градиента объективной функции. После получения вектора градиента параметры сети обновляются с помощью соответствующего метода оптимизации на основе градиента, например метода крутого спуска [6, 19]:

$$c_{ki}(t+1) = c_{ki}(t) - \eta_c \frac{\partial E(t)}{\partial c_{ki}}, \quad (15)$$

$$\sigma_{ki}(t+1) = \sigma_{ki}(t) - \eta_\sigma \frac{\partial E(t)}{\partial \sigma_{ki}}, \quad (16)$$

$$b_{ki}(t+1) = b_{ki}(t) - \eta_b \frac{\partial E(t)}{\partial b_{ki}}, \quad (17)$$

Вышеописанные этапы проводятся рекурсивно до тех пор, пока все параметры модели не будут вычислены до определенной точности.

Вычисление градиента целевой функции для обучающего примера (x, d) представлено следующим образом:

$$\frac{\partial E(t)}{\partial c_{ki}} = (y(x) - d) \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial \overline{w}_i}{\partial c_{ki}}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial E(t)}{\partial \sigma_{ki}} = (y(x) - d) \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial \overline{w}_i}{\partial \sigma_{ki}}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial E(t)}{\partial b_{ki}} = (y(x) - d) \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial \overline{w}_i}{\partial b_{ki}}, \quad (20)$$

где частные производные от параметров колоколообразной функции принадлежности вычисляются по следующей формуле:

$$\frac{\partial \overline{w}_i}{\partial c_{ki}} = \frac{\delta_{ki} m(x_k) - l(x_k)}{[m(x_k)]^2} \prod_{s,s \neq k} \mu_{si}(x_s) \frac{\left[\frac{2b_{ki}(x_k - c_{ki})}{\sigma_{ki}} \right]^{2b_{ki}-1}}{\left[1 + \left(\frac{x_k - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right)^{2b_{ki}} \right]^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \overline{w}_i}{\partial \sigma_{ki}} = \frac{\delta_{ki} m(x_k) - l(x_k)}{[m(x_k)]^2} \prod_{s,s \neq k} \mu_{si}(x_s) \frac{\left[\frac{2b_{ki}(x_k - c_{ki})}{\sigma_{ki}} \right]^{2b_{ki}-1}}{\left[1 + \left(\frac{x_k - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right)^{2b_{ki}} \right]^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \bar{w}_{ki}}{\partial b_{ki}} = \frac{\delta_{ki} m(x_k) - l(x_k)}{[m(x_k)]^2} \prod_{s, s \neq k} \mu_{si}(x_s) \frac{\left[-2 \left(\frac{x_k - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right)^{2b_{ki}} \ln \left(\frac{x_k - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right) \right]}{\left[1 + \left(\frac{x_k - c_{ki}}{\sigma_{ki}} \right)^{2b_{ki}} \right]^2} \quad (23)$$

для $h=1, 2, \dots, n$, (n – количество ветвей дерева (правил)), δ_{ki} обозначает дельту Кронекера:

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 1, & k = i, \\ 0, & k \neq i. \end{cases} \quad (24)$$

$l(x_k) = \prod_{s, s \neq i} \mu_{si}(x_s)$, $m(x_k) = \prod_{s, s \neq i} \mu_{si}(x_s)$ для всех переменных x_s , встречающихся в i -й ветви дерева решений и включенных в i -е правило.

Расчет градиента искомой функции на основе параметров гауссовой функции принадлежности. Для выполнения поставленной задачи необходимо определить тип функции принадлежности и с точностью вычислить ошибки в результате работы сети. Например, при применении базовой гауссовой функции:

$$\mu(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (25)$$

Соответствующая формула градиента целевой функции для одного примера (x, d) из обучающих выборок имеет следующий вид:

$$\frac{\partial E}{\partial c_{ki}} = (y - d)(n_i - y) \bar{w}_i \frac{2(x_k - c_{ki})}{(\sigma_{ki})^2}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ki}} = (y - d)(n_i - y) \bar{w}_i \frac{2(x_k - c_{ki})^2}{(\sigma_{ki})^3}, \quad (27)$$

$$\text{где } \bar{w}_i = \frac{\prod_k \mu_{ki}(x_{kj})}{\sum_{i=1}^n [\prod_k \mu_{ki}(x_{kj})]}$$

На рисунке 3 представлены средние соотношения среднеквадратичных ошибок в экспериментах по тестовым данным при 10-кратной перекрестной проверке, стандартное отклонение ошибок представлено в круглых скобках.

Рисунок 3 представляет средние соотношения корневых среднеквадратичных ошибок в экспериментах на тестовых данных в 10-кратной перекрестной проверке, стандартное отклонение ошибок представлено в скобках.

No	Test set	Fuzzy decision tree		Modified Wang and Mendel fuzzy neural production MIMO- network	
		Average ratio of RMS errors	Standard deviation	Average ratio of RMS errors	Standard deviation
1	Breast	1.49	(0.00)	0.29	(0.0)
2	Credit	7.81	(0.00)	2.18	(0.48)
3	Cylinder	6.16	(4.51)	1.43	(3.18)
4	Diabetes	21.84	(1.27)	4.19	(1.15)
5	Gamma	21.13	(0.70)	2.53	(3.41)
6	Glass	39.13	(0.00)	5.85	(0.43)
7	Haberman	26.67	(0.00)	3.27	(1.47)
8	Heart	14.44	(5.60)	2.89	(0.87)
9	Ionosphere	3.99	(7.35)	0.53	(0.00)
10	Iris	8.00	(2.67)	3.48	(2.56)
11	Liver	36.76	(4.65)	4.13	(3.16)
12	Segmentation	12.38	(2.33)	0.14	(0.07)
13	Spam	28.98	(0.00)	2.51	(0.18)
14	Steel	20.78	(0.93)	4.17	(0.24)
15	Vehicle	25.37	(1.80)	2.95	(1.64)
16	Wine	5.00	(6.43)	0.18	(3.82)

Рисунок 3 – Корневая среднеквадратичная ошибка классификации до и после параметрических настроек нейро-нечеткого классификатора

Обсуждение. Следует отметить, что практическая значимость модифицированной нечеткой нейронной сети Ванга-Менделя для производственных ММО-систем обусловлена широкими возможностями ее применения в интеллектуальных системах, предназначенных для анализа и поддержки принятия многокритериальных решений [8, 18].

Предлагается инновационная архитектура нейро-нечеткой древовидной системы принятия решений (ННДСПР), альтернативная традиционным продукционным системам с нечеткой логикой. Ключевым отличием метода является автоматизированная генерация онтологии нечетких правил посредством рекурсивного ветвления узлов дерева, обеспечивающая эффективную классификацию объектов в многомерных признаковых пространствах высокой размерности. Процедура синтеза правил

реализуется через интеграцию экспертных знаний в виде аннотированных датасетов и семантических ограничений, что позволяет комбинировать преимущества символьного и субсимволического подходов к машинному обучению.

Выводы. Сформированную базу знаний можно интерпретировать как разделение факторного пространства на области с размытыми границами, где выходные значения также носят нечеткий характер. Количество таких областей соответствует количеству правил в системе.

Предложенный метод адаптации параметров древовидной системы (нейро-нечеткой иерархии) включает механизм обратного распространения ошибки от конечных узлов (листьев) к корню. Это повышает точность классификации при сохранении интерпретируемости структуры и её логической

целостности.

В отличие от стандартных эвристик для построения нейро-нечетких сетей, которые часто создают избыточно сложные модели с высокими вычислительными затратами, данный подход оптимизирует архитектуру сети, сокращая число лишних элементов и ресурсоёмкость [10, 19].

С экспертной точки зрения, метод представляет собой новый интеллектуальный инструмент для форсайт-анализа. Он обеспечивает глубокую аналитику и обоснованное принятие решений в сфере технологических инноваций, сочетая логическую прозрачность с адаптивностью нейросетевых алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Парфёнов Д.И. Исследование алгоритмов адаптивных нейро-нечетких сетей anfis для решения задачи идентификации сетевых атак / Парфёнов Д.И., Болодурина И.П., Забродина Л.С., Жигалов А.Ю. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2020. – Т. 16. № 3. – С. 533-542.
2. Федорова О.А. Теоретические основы использования методологии форсайта в прогнозировании развития промышленных предприятий / Федорова О.А. // Современные научные исследования и разработки. – 2019. – № 1 (30). – С. 1051-1056.
3. Жетимекова, Г.Ж. Нечеткая классификация с использованием нечеткого анализа кластеризации / Г.Ж. Жетимекова // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. – 2014. – № 4. – С. 117-120. – EDN UMKRWN.
4. Р.В. Допира, Оценка эффективности методического и алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия решений специального назначения / Р.В. Допира, А.Н. Потапов, Д.Ю. Брежнев [и др.] // Программные продукты и системы. – 2019. – № 2. – С. 273-282. – EDN ECHWVQ.
5. Аль-Раммахи, А.А. Повышение эффективности кластеризации на основе нечеткого Simhash-алгоритма с-средних для аналитики больших данных / А.А. Аль-Раммахи, Ф. А. Сари // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей II международной научно-практической конференции в 2-х т., Тамбов, 21–23 октября 2020 года. Том I. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 269-274. – EDN DXRQOF.
6. Доан, Д.Х. Исследование статистических данных методом нечеткой кластеризации / Д.Х. Доан, А.В. Кропилин, С.В. Кропилина // Математика: фундаментальные и прикладные исследования и вопросы образования: материалы международной научно-практической конференции, Рязань, 26–28 апреля 2016 года. – Рязань: Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, 2016. – С. 210-213. – EDN XFEOPX.
7. Мальков, А.А. Метод нечеткой кластеризации для управления многорежимным технологическим процессом / А.А. Мальков // Актуальные вопросы науки. – 2017. – № 34. – С. 120-122. – EDN ZVRLYV.
8. Sherstneva, Yu. G. The use of neural networks in high-tech areas / Yu. G. Sherstneva, V. D. Dmitriev // Решетневские чтения: Материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 09-11 ноября 2022 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логина. Часть 2. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – Р. 196-198. – EDN MEMYPU.
9. Баранов, А.О. Синтез метода реальных опционов и метода нечетких множеств для оценки эффективности инновационных проектов: критический обзор / А.О. Баранов, Е.И. Музыко, В.Н. Павлов // Идеи и идеалы. – 2018. – Т. 2, № 1(35). – С. 190-209. – DOI 10.17212/2075-0862-2018-1.2-190-209. – EDN YWSIQS.
10. Прохоренков, А.М. Об использовании методов нечеткой логики для определения характеристик случайных процессов / А.М. Прохоренков // Сборник материалов международной конференции "XXIX Крымская Осенняя Математическая Школа-симпозиум по спектральным эволюционным задачам" КРОМШ-2018, пос. Батилиман (Севастополь), 17-29 сентября 2018 года. – пос. Батилиман (Севастополь): ООО "Полипринт", 2018. – С. 111-112. – EDN YPAWFV.
11. Аль-Раммахи, А.А. Повышение эффективности кластеризации на основе нечеткого Simhash-алгоритма с-средних для аналитики больших данных / А.А. Аль-Раммахи, Ф.А. Сари // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей II международной научно-практической конференции в 2-х т., Тамбов, 21-23 октября 2020 года. Том I. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 269-274. – EDN DXRQOF.
12. Мальков, А.А. Метод нечеткой кластеризации для управления многорежимным технологическим процессом / А.А. Мальков // Актуальные вопросы науки. – 2017. – № 34. – С. 120-122. – EDN ZVRLYV.
13. Адаптивная нечеткая кластеризация данных на основе метода Густафсона-Кесселя / Е.В. Бодянский, Б.В. Колчигин, В.В. Волкова, И.П. Плисс // Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2(244). – С. 40-46. – EDN STKYKN.
14. Соколова, Ю.С. Решение задачи классификации данных с использованием алгоритма нечетких с-средних и SVM-алгоритма / Ю.С. Соколова // Задачи системного анализа, управления и обработки информации: Межвузовский сборник научных трудов. Том Выпуск 5. – Москва: Негосударственное образовательное учреждение высшего образования Московский технологический институт, 2015. – С. 140-147. – EDN TOOCUF.
15. Акинина, Н.В. Использование алгоритма нечетких с-средних для выделения образов на спутниковых снимках / Н.В. Акинина // Актуальные проблемы современной науки и производства: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции, Рязань, 27-29 ноября 2019 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2019. – С. 191-196. – EDN ZUFRDB.
16. Разработка методов нечеткой кластеризации сетевых ресурсов информационных систем / А.С. Вишняков, А.Е. Макаров, А.В. Уткин [и др.] // Наука, техника и образование. – 2019. – № 5(58). – С. 24-33. – EDN LVTKUJ.
17. Лисых, А.С. Нейронные сети. Применение нейронных сетей в автоматизации процессов / А.С. Лисых, А.А. Турчина, С.А. Шадрин // Исследования молодых ученых: Материалы LIII Международной научной конференции, Казань, 20-23 января 2023 года. – Казань: Молодой ученый, 2023. – С. 1-6. – EDN EWWJPU.
18. Гильмутдинов, И.Х. Алгоритм распознавания изображений, основанный на сочетании коллективного кластерного анализа и ядерных методов распознавания образов / И.Х. Гильмутдинов // Материалы 54-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2016: Математика, Новосибирск, 16-20 апреля 2016 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2016. – С. 83. – EDN XEZPYX.
19. Думболов, Д.У. Проведение сравнительного анализа Attention OCR и Tesseract в задаче распознавания символов на изображениях преysкурантов / Д.У. Думболов, С.В. Тюнин, А.В. Марков // Евразийский союз ученых. – 2020. – № 6-1(75). – С. 57-59. – EDN OKBYKP.
20. Кручинин, А.Ю. Управление режимом распознавания протяженного объекта в реальном времени на основе оценки сложности каждого этапа распознавания / А.Ю. Кручинин // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 1(68). – С. 16-22. – EDN RYEXER.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК: 616.12-07; 621.396

EDN: ZZITJQ

КЛИЕНТ-СЕРВЕРНАЯ СТРУКТУРА И ПОМЕХОУСТОЙЧИВАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В СКРИНИНГОВОЙ СИСТЕМЕ НЕИНВАЗИВНОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОДИАГНОСТИКИ

©Автор(ы) 2025

SPIN: 3307-4732

AuthorID: 1115388

ORCID: ID 0009-0005-9735-9806

ResearcherID: MVT-5756-2025

ScopusID: 57195328016

БОДИН Андрей Юрьевич, аспирант кафедры основ радиотехники

«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

(111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, e-mail: bodin98@mail.ru)

Аннотация. Необходимость скринингового обследования для сохранения индивидуального здоровья сердечно-сосудистой системы – очевидна. Современный человек живёт в условиях напряжённого ритма жизни и постоянного эмоционального стресса, что приводит к различным нарушениям в работе функциональных систем организма, вплоть до потери трудоспособности. Актуальность исследований не вызывает сомнений, так как согласно статистике сердечно-сосудистых заболеваний, инфаркт миокарда «молодеет». Целью исследования является разработка клиент-серверной структуры и обеспечение помехоустойчивой передачи данных в скрининговой системе неинвазивной электрокардиодиагностики. Методология исследования основана на использовании междисциплинарного подхода, базирующегося на научных положениях теории систем и системного анализа, теории помехоустойчивого кодирования, методах цифровой обработки сигналов для обеспечения помехоустойчивости и помехозащищённости в системах различного назначения. Результатами работы являются клиент-серверная структура скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики, алгоритмы формирования и помехоустойчивая передача пакетов данных с значениями потенциалов множественных отведений по беспроводному каналу связи. Разработанная клиент-серверная структура скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики на основе множественной регистрации электрокардиосигналов позволяет своевременно выявлять сердечно-сосудистые заболевания. Применение методов теории помехоустойчивого кодирования позволило повысить помехоустойчивость канала связи. Использование многопоточной обработки данных на стороне сервера привело к сокращению временные ресурсов.

Ключевые слова: клиент-серверная структура, скрининговая система неинвазивной электрокардиодиагностики, электрокардиосигнала, помехоустойчивое кодирование, многопоточная обработка данных.

CLIENT-SERVER STRUCTURE AND NOISE-IMMUNE DATA TRANSMISSION IN THE SCREENING SYSTEM OF NON-INVASIVE ELECTROCARDIODIAGNOSIS

©The Author(s) 2025

BODIN Andrey Yuryevich, postgraduate student Department of Fundamentals of Radio Engineering

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

(111250, Russia, Moscow, Krasnokazarmennaya 14, build. 1, e-mail: bodin98@mail.ru)

Abstract. Relevance. To maintain individual health, the need for a cardiovascular screening examination is obvious. Modern man lives in conditions of a tense rhythm of life and constant emotional stress, which leads to various disorders in the functioning of the body's functional systems, up to and including loss of ability to work. Taking into account the statistics of cardiovascular diseases (myocardial infarction is "getting younger"), the relevance of the study is beyond doubt. The purpose of the study is to develop a client-server structure and ensure noise-resistant data transmission in a screening system for non-invasive electrocardiographic diagnostics. The research methodology is founded on the use of an interdisciplinary approach based on the scientific principles of systems theory and systems analysis, the theory of noise-resistant coding, methods of ensuring reliable information processing and ensuring noise immunity of information communications for the purposes of transmitting, storing and protecting information, as well as methods and algorithms for processing signals and information in systems for various purposes in the presence of interference in order to increase their throughput, noise immunity and noise protection. The results of the work are a client-server structure of a screening system for non-invasive electrocardiological diagnostics and algorithms for the formation and noise-resistant transmission of data packets of electrocardiographic signals of multiple leads via a wireless communication channel. Conclusions. A client-server structure of a screening system for non-invasive electrocardiological diagnostics based on recording electrocardiographic signals of multiple leads has been developed. The application of methods of the theory of noise-resistant coding allows, when transmitting data packets of electrocardiographic signals of multiple leads over a wireless communication channel, to optimize the processes of transmission and processing by changing the parameters of coding and processing; to reduce the time of data processing due to multi-threading.

Keywords: client-server structure, screening system of non-invasive electrocardiodiagnostics, electrocardiosignal, noise-immune coding, multi-threaded data processing.

Для цитирования: Бодин А.Ю. Клиент-серверная структура и помехоустойчивая передача данных в скрининговой системе неинвазивной электрокардиодиагностики / А.Ю. Бодин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 17-26. – EDN: ZZITJQ.

Введение. Первое место по смертности в России и в мире занимают заболевания сердечно-сосудистой системы, в основе которых лежит прогрессирующий атеросклероз. Скрининг в медицине осуществляют с целью ранней диагностики заболевания или выявления предрасположенности к нему.

Анализ современных методов и средств неинвазивной электрокардиодиагностики на основе многоэлектродной регистрации электрокардиосигналов показал [1-4]:

- во-первых, методы и средства неинвазивной электрокардиодиагностики на основе многоэлектродной регистрации электрокардиосигналов не используются в условиях скринингового обследования;
- во-вторых, несмотря на небольшую протяжённость радиоканала (не более 100 метров) необходимо помехоустойчивое кодирование при передаче электрокардиосигналов (ЭКС) множества отведений по беспроводному каналу связи.

Целью исследования является разработка клиент-серверной структуры и обеспечение помехоустойчивой передачи данных в скрининговой системе неинвазивной электрокардиодиагностики.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- обоснование клиент-серверного подхода к построению скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики (ССНЭКД);
- формирование пакета передаваемых данных и разработка алгоритма помехоустойчивой передачи пакета данных.

Методология. Клиент-безопасные приложения. По мнению автора, клиент-серверная архитектура [5] при построении скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики (ССНЭКД) является наиболее подходящей (рис. 1), так как обеспечивает оптимальную организацию скринингового обследования и сопутствующего информационного взаимодействия.

Компьютеризация здравоохранения сделала возможным внедрение ССНЭКД в лечебно-профилактические учреждения (ЛПУ) различных уровней, от городских больниц до фельдшерско-акушерских пунктов (ФАП) в сельской местности, что накладывает особые требования на достоверность передачи данных с клиента на сервер ССНЭКД. При этом применение устройств многоэлектродной регистрации электрокардиосигналов (ЭКС) в качестве клиента клиент-серверной архитектуры ССНЭКД является перспективным направлением развития медицинской техники, поскольку данные устройства будут оснащены большим количеством интерфей-

сов (BLE, GSM, GPRS, GPS/ГЛОНАСС, SMS и др.), благодаря чему могут быть решены задачи сетевого взаимодействия. Как следует из анализа рисунка 1 клиент-серверная архитектура ССНЭКД содержит три функциональных модуля:

- модуль регистрации множественных отведений ЭКС;
- канал связи;
- сервер ССНЭКД.

Функциональное назначение модуля регистрации множественных отведений ЭКС заключается в регистрации сигналов множественных отведений, их предварительной обработке (усилении и фильтрации) и подготовке к передаче данных.

Функциональное назначение канала связи заключается в достоверной передаче данных с клиента на сервер ССНЭКД. Для этого в клиентской части осуществляются помехоустойчивое кодирование и формирование пакетов данных. Затем по одному из стандартных интерфейсов осуществляется передача данных.

В серверной части ССНЭКД осуществляются декодирование и помехозащищённая обработка данных, формирование цифрового двойника сердца и определение электрофизиологических характеристик сердца на его основе. Отличительной особенностью клиент-серверной архитектуры (рис.1), в сравнении со множеством других, является доказуемая безопасность сетевых коммуникаций исключительно клиентской стороной. Иными словами, это говорит о том, что даже если информация будет передаваться серверной стороне или храниться на ней, то сервисы всё равно не смогут проанализировать или видоизменить такого рода данные «без разрешения», так как они находятся в зашифрованном или аутентифицированном виде.

Передача данных на сервер ССНЭКД осуществляется в рамках семиуровневой модели взаимодействия открытых систем *OSI – Open System Interconnection* [6]. Модель *OSI* является основной архитектурной моделью для систем передачи сообщений. В рамках модели *OSI* на рисунках 2 и 3 приведены структура кадра и алгоритм передачи пакета соответственно.

При рассмотрении конкретных прикладных телекоммуникационных систем производится сравнение их архитектуры с моделью *OSI/ISO*. Согласно модели *OSI/ISO*, на стороне клиента-отправителя (устройство многоэлектродной регистрации ЭКС – жилет с электродами) транспортный уровень преобразует данные прикладного уровня, которые получает от передающего прикладного процесса, в пакеты транспортного уровня (рис. 2).

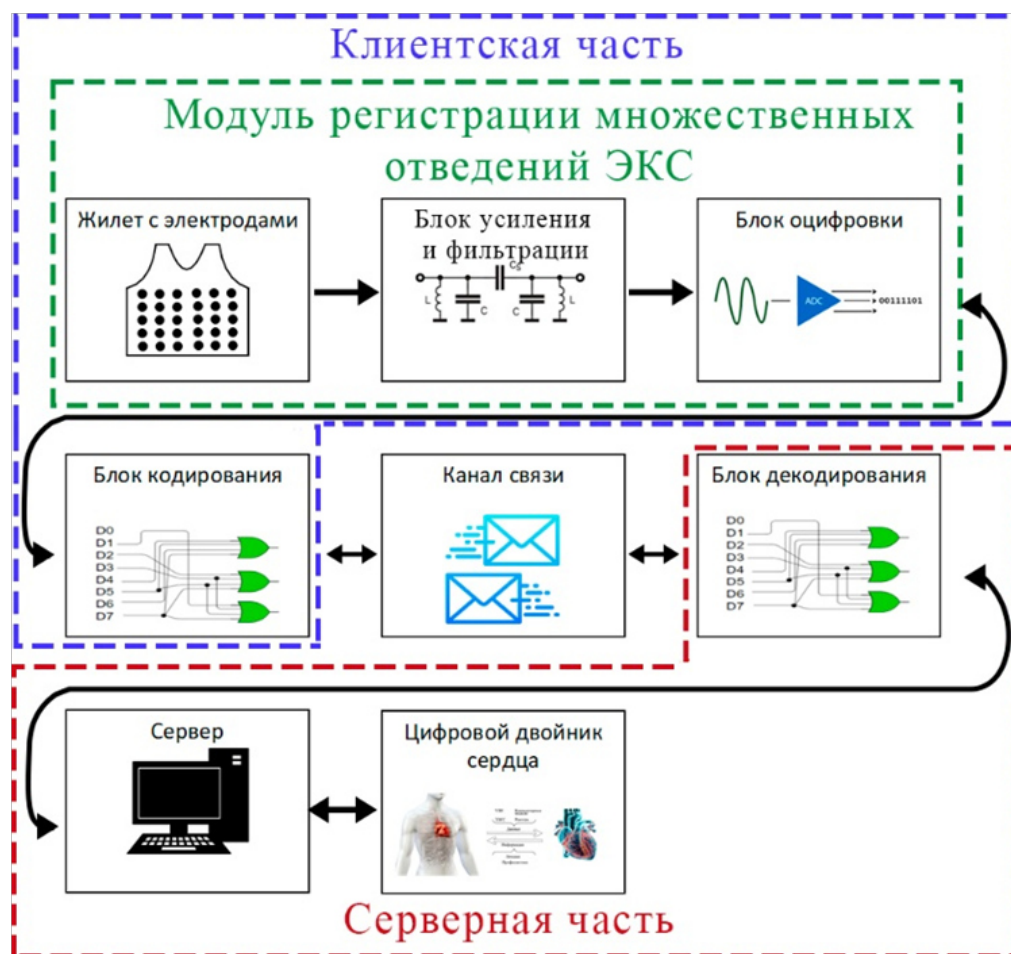


Рисунок 1 – Клиент-серверный подход к построению ССНЭКД

При этом гарантируется доставка пакетов без ошибок, в той же последовательности, без потерь и дублирования и осуществляется переупаковка пакетов: длинные разбиваются, короткие объединяются. Также принимается сигнал подтверждения приема (рис. 3).

По мнению автора, гарантированная доставка пакетов без ошибок обеспечивается помехоустойчивым кодированием данных. Проведённые обзоры показывают, что отрасль помехоустойчивого кодирования бурно развивается [7]. Процедура выбора помехоустойчивого кода, соответствующего каналу связи, содержит в себе внутреннее противоречие. С одной стороны, на стадии проектирования системы связи выбор кода выполняют, исходя из предполагаемых характеристик каналов, с другой

стороны, на стадии эксплуатации характеристики реальных каналов связи могут отличаться от тех характеристик, которые были приняты при проектировании системы связи. Это может приводить к погрешностям выбранных параметров кода, а значит, к снижению помехоустойчивости связи или к уменьшению скорости передачи сообщений. Разрешение данного противоречия заключается в адаптивной коррекции параметров кода, обеспечивающей вероятность доведения сообщения в канале, равную заданной величине при минимальной избыточности помехоустойчивого кода [8].

Для этого автором предлагается следующий «технологический конвейер» помехоустойчивого кодирования данных (рис. 4).

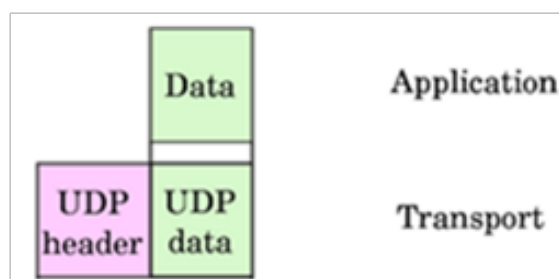


Рисунок 2 – Структура кадра



Рисунок 3 – Алгоритм передачи пакета

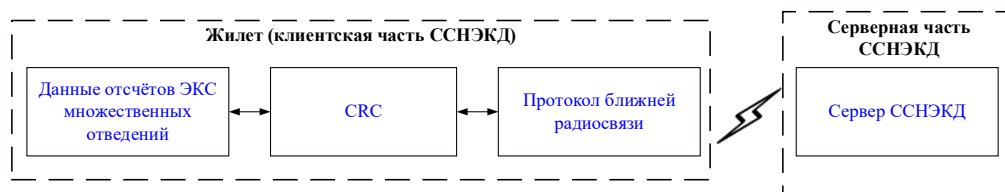


Рисунок 4 – Помехоустойчивая передача данных в рамках локальной ССНЭКД

При помехоустойчивой передаче данных в рамках локальной ССНЭКД (рис. 4) сформированные байты данных отсчётов множественных отведений ЭКС, предназначенные для передачи «оснащаются» дополнительным контрольным кодом – *CRC* (*cyclic redundancy code*).

CRC представляет собой вычисленное на основе исходного передаваемого сообщения число (или можно сказать код), которое по протоколу ближней радиосвязи передаётся вместе с самим сообщением (дописывается в конец информационной части) и служит для контроля его безошибочной передачи. При локальной реализации ССНЭКД расстояние между клиентом и сервером не превышает 40 метров, что позволяет интерфейсу *BLE 5.0* гарантированно

передавать данные.

На рисунках 4 и 5 символом ⚡ обозначен радиоканал. При помехоустойчивой передаче данных в рамках территориально распределённой ССНЭКД (рис. 5) осуществляется помехоустойчивое кодирование данных средствами протокола дальней радиосвязи на основе каскадного кодирования и оптимизационной теории помехоустойчивого кодирования [9]. В этом основополагающем труде по теории кодирования авторами убедительно показано преимущества каскадных схем перед обычными алгоритмами кодирования. При этом расстояние между клиентом и сервером может достигать тысячи километров и без услуг систем спутниковой связи не обойтись.

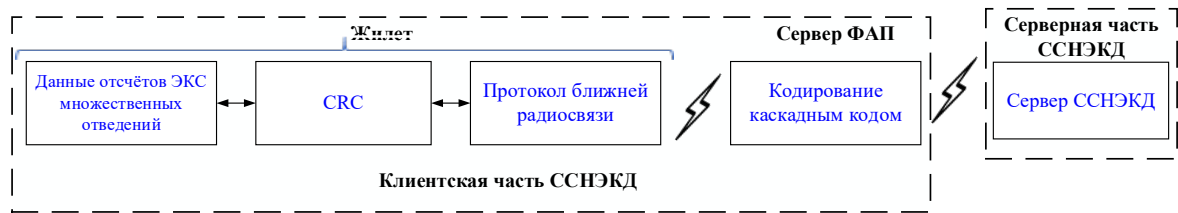


Рисунок 5 – Помехоустойчивая передача данных в рамках территориально распределённой ССНЭКД

Результаты. Достоверность передачи данных.
Достоверность передачи данных обеспечивается введением обязательного поля для размещения помехоустойчивого (корректирующего) кода. Пропускная способность канала связи C_k связана с вероятностью ошибки при передаче данных $P_{ои}$ следующим образом

$$V_x \cdot l_{cp} = H(x) \leq C_k = V_k \cdot [1 - H(P_{ои})], \quad (1)$$

где V_x – скорость передачи отсчёта ЭКС в секунду;
 l_{cp} – разрядность отсчёта ЭКС; $H(x)$ – энтропия отсчёта ЭКС при передаче; C_k – пропускная способность канала связи; $P_{ои}$ – вероятность ошибки при передаче данных.

В любом случае средствами ССНЭКД осуществляется формирование помехоустойчивых данных для достоверной передачи. В зависимости от типа канала связи, достоверность изменяется в пределах 10^{-6} до 10^{-14} . Стандартом [10] при обмене информацией введены три класса для достоверной передачи данных DI (вероятность необнаруженных ошибок R):

$DI_1: R \leq 10^{-6}$ для $p \leq 10^{-4}$;
 $DI_2: R \leq 10^{-10}$ для $p \leq 10^{-4}$;
 $DI_3: R \leq 10^{-14}$ для $p \leq 10^{-4}$;

где p – частота искажений бита для среды передачи.

Для CRC вероятность не выявленной ошибки можно рассчитать, как:

$$P_{CRC} = (1/2)^k = (1/2)^{16} = 15 \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

где k – количество битов в контрольной сумме, в случае с CRC¹⁶, $k = 16$.

Определить точную общую вероятность ошибки для Bluetooth Low Energy (BLE 5.0) в реальных условиях передачи достаточно сложно, поскольку она зависит от множества факторов, таких как:

- качество канала связи (уровень помех, шум);
- скорость передачи данных;
- мощность сигнала.

Стандарт BLE заявляет, что вероятность того, что переданный бит будет неправильно декодирован приемником составляет не более 0.001% [11].

$$BER_{BLE} \leq 10^{-3} \quad (3)$$

где BER (bit error rate) – это вероятность того, что переданный бит будет неправильно декодирован приемником.

Структура пакета BLE также содержит поле CRC¹⁶, для расчёта вероятности невыявленной ошибки пакета BLE воспользуемся следующей формулой:

$$P_{BLE} = (N_{BLE \text{ TOTAL FRAME LEN}} * 8 * BER_{BLE}) * P_{CRC} = (260 * 8 * 10^{-3}) * (15 * 10^{-6}) = 3 * 10^{-5} \quad (4)$$

где P_{BLE} – вероятность невыявленной ошибки

в худшем случае, $N_{BLE \text{ TOTAL FRAME LEN}}$ – максимально возможная длина пакета BLE 5.0 в байтах [11], число 8 – это количество бит в одном байте, BER (bit error rate) – это вероятность того, что переданный бит будет неправильно декодирован приемником (3).

Для расчёта общей вероятности неправильного декодирования пакета системы ССНЭКД воспользуемся следующей формулой:

$$P_{total} = P_{CRC} * P_{BLE} = 15 * 10^{-6} * 3 * 10^{-5} = 45 * 10^{-11} \quad (5)$$

где P_{CRC} – вероятность невыявленной ошибки на уровне кадра, P_{BLE} – вероятность ошибки стандарта BLE 5.0.

Формирование пакетов данных множественных отведений ЭКС необходимо для:

- преобразования массива данных АЦП о потенциалах электродов в структурированный формат при передаче по каналу связи, соединяющем блок регистрации множественных отведений с сервером ССНЭКД (рис. 1);

- обеспечения передачи данных с учётом количественных характеристик канала связи.

Преобразования осуществляется блоком оцифровки модуля регистрации множественных отведений (рис. 1). На данном этапе информацию об электрических потенциалах со всех электродов, представленную в виде массива данных АЦП, необходимо упаковать в структурированные пакеты данных для передачи по каналу связи.

В каждом пакете упаковываются основные данные и заголовок. Пакет данных множественных отведений ЭКС состоит из двух типов данных: управляющей информации и непосредственно данных множественных отведений ЭКС (называемых также полезной нагрузкой). Структура пакета данных множественных отведений ЭКС содержит два основных поля:

- заголовок – служебную информацию, например, идентификатор канала, временную метку, номер пакета;
- основные данные, закодированные помехоустойчивым кодом.

Каждый пакет содержит информацию о значении потенциала только одного канала. Разделение информации на небольшие пакеты данных уменьшает потери при ошибках и упрощает работу на уровне протокола передачи. Структура пакета данных определяется параметрами канала связи ССНЭКД. На рисунке 6 представлена структура пакета данных, выбранная авторами для дальнейшего рассмотрения.

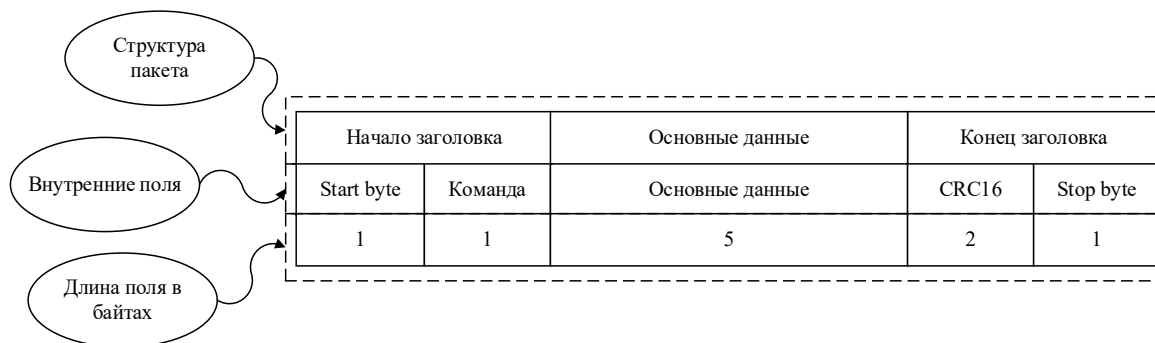


Рисунок 6 – Заполнение пакета данных

Структура пакета данных определяется параметрами канала связи ССНЭКД. На рисунке 6 представлена структура пакета данных, выбранная автором для дальнейшего рассмотрения.

Структура пакета данных на рисунке 6 является пакетом фиксированной длины, что облегчает процесс формирования и расшифровки пакетов. Разделение информации на небольшие пакеты данных, уменьшает потери при ошибках и упрощает работу на уровне протокол передачи. Кадр содержит «маркеры» начала и конца пакета, поле «команда», поле для контрольной суммы и поля с актуальной информацией.

Рассчитаем длину кадра:

$$N_{frame} = 1+1+5+2+1=10 \text{ байт}, \quad (6)$$

где N_{frame} – общая длина кадра в байтах, равная сумме длин всех полей в кадре.

Скорость канала связи зависит от частоты дискретизации, разрядности АЦП, количества электродов, размера пакета данных. Для определения скорости канала связи, необходимо определить время формирования массива значений потенциалов множественных отведений.

Большая часть АЦП передает данные по одному из двух интерфейсов связи – SPI и I2C, в специализированных для регистрации биопотенциалов АЦП преобладает интерфейс SPI [12]. Для расчёта времени передачи информации о значении потенциалов с 64 каналов используется формула

$$t_{adc\ answer} = (1/F_{adc\ spi}) * ADC_{data\ size} = (1 / 8*10^6) * 1552 = 194 \text{ мкс} \quad (7)$$

где $t_{adc\ answer}$ – время передачи массива информации о значении 64 каналов ЭКС между блоком регистрации и АЦП, $F_{adc\ spi}$ – частота интерфейса SPI [130], $ADC_{data\ size}$ – размер цифрового кода в битах.

Определив время формирования массива значений потенциалов множественных отведений, можно определить необходимую скорость канала связи:

$$V_{interface} = (N_{frame} * N_{electrodes}) / (1 / F_{ECG\ sample} - t_{adc\ answer}) \quad (8)$$

$$(10*64) / 0.000806 = 794044 \text{ байт/с} \approx 0.794 \text{ Мбайт/с}$$

где N_{frame} – общий размер кадра, равный 10 байтам (рис. 6), $N_{electrodes}$ – количество электродов, $F_{ECG\ sample}$ – частота дискретизации, $t_{adc\ answer}$ – время передачи массива информации о значении 64 каналов ЭКС между блоком регистрации и АЦП (время формирования массива данных от АЦП).

На рисунке 7 представлена временная диаграмма, поясняющая процессе формирования данных от АЦП и передачи данных на сервер.

Пропускная способность должна быть выше расчетной скорости передачи данных, чтобы избежать потерь.

Для уменьшения нагрузки на канал можно использовать сжатие или буферизацию.

Таким образом, этап формирования пакетов данных учитывает специфику канала связи, оптимизацию для минимизации задержек и надежность передачи, что критически важно для систем множественной регистрации ЭКС.

Таким образом, согласно формуле 8 минимальная пропускная способность канала должна быть не меньше 0.797 Мбайт/с (или 6,4 Мбит/с).



Рисунок 7 – Временная диаграмма формирования массива данных АЦП и передачи структурированных данных на сервер

К общим характеристикам канала связи ССНЭКД относятся:

– Ширина полосы частот, которая определяет передаваемый через канал связи диапазон частот. Диапазон частот ΔF , передаваемых в ССНЭКД сигналов, определяется частотным спектром ЭКС и охватывает диапазон от 0,05 до 800 Гц. Максимальная емкость C канала связи определяется следующим образом:

$$C = \Delta F * \log_2(1 + S/N), \quad (9)$$

где S – сигнал, N – шум.

Чрезмерное сужение частотного диапазона со стороны нижних частот f_n приводит к искажению сегмента ST и зубца T электрокардиосигнала, но уменьшает смещение изолинии, а со стороны высоких f_g – к сглаживанию QRS -комплекса электрокардиосигнала и уменьшению крутизны его склонов. Наиболее информативная часть электрокардиосигнала содержится в диапазоне $\Delta F = 0,05 - 100$ Гц [13].

– Скорость передачи данных определяет пропускную способность канала связи, то есть, количество информации, передаваемое за единицу времени и измеряется в бит/с. Объем переданной информации I вычисляется по формуле:

$$I = C_k * t, \quad (10)$$

где C_k – пропускная способность канала связи (в битах в секунду или подобных единицах), а t – время передачи.

– Затухание сигнала показывает уменьшение энергии сигнала при передаче. Коэффициент затухания вычисляется как отношение мощности сигнала, поданного в линию, к мощности полученного на конце линии сигнала, и измеряется в децибелах на единицу длины:

$$\beta = 10 * \lg(P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}}), \quad (11)$$

где β – коэффициент затухания; $P_{\text{вх}}$ – мощность сигнала, поданного в канал связи; $P_{\text{вых}}$ – мощность полученного с канала связи сигнала.

По мнению автора, затуханием передаваемых в ССНЭКД сигналов можно пренебречь из-за наибольших расстояний при передаче данных.

– Надёжность канала связи заключается в его способности передавать информацию без искажений, что обеспечивается устойчивостью к помехам и возможностью исправления ошибок передачи. Надёжность канала связи ССНЭКД определяется либо долей времени исправного состояния в общем времени работы, либо средним временем безотказной работы в часах.

Анализ рисунка 1 показывает, что в ССНЭКД по физической природе возможна как проводная, так и беспроводная передача данных. По виду электрических сигналов по проводным каналам связи возможна передача как аналоговых сигналов, так и цифровых, а по беспроводным каналам связи осуществляется передача только цифровых сигналов. При этом передача данных между клиентом и сервером ССНЭКД осуществляется в симплексном

режиме.

Действительно, согласно рисунку 1 на стороне клиентской части ССНЭКД с жилета с электродами по проводным каналам связи передаются на АЦП через блок фильтрации аналоговые сигналы, которые в АЦП преобразуются в цифровые сигналы и также по проводным каналам связи передаются в блок помехоустойчивого кодирования, где формируются в пакеты данных для передачи по каналу связи от клиента на сервер ССНЭКД. Этот канал связи может быть представлен как в проводной, так и беспроводной реализациях.

В серверной части ССНЭКД передача данных осуществляется только по проводным, цифровым каналам связи.

При передаче и обработке сигналов множественных отведений ЭКС электромагнитные помехи могут представлять серьезную проблему для электронных изделий, а потому требуют особого внимания со стороны разработчиков. Автором предлагается осуществлять необходимую помехоустойчивую передачу и обработку сигналов множественных отведений ЭКС при проводной и беспроводной реализациях канала связи следующим образом.

При проводной передаче данных применяются скручивание (витая пара), экранирование и функциональное заземление, реализуемое для обеспечения работоспособности. Это необходимые меры для обеспечения помехоустойчивости линии связи при передаче данных в конструкции жилета и при проводной передаче данных с блока регистрации множественных отведений на сервер ССНЭКД (рис. 1) [14].

Скручивание подводящих проводников позволяет уменьшить наведенную электродвижущую силу (ЭДС) от внешних электромагнитных полей. Кроме того, скручивание дает возможность лучше сбалансировать емкость на "землю" этих проводников. Для уменьшения этого уровня наводок оба подводящих к усилителю биопотенциалов (УБП) проводника целесообразно размещать в одном экране.

Экранирование служит основным средством ослабления электромагнитных помех, вызванных излучением, и позволяет избавиться от большинства наведенных помех. При заземлении экранированная витая пара обеспечивает отличную защиту от электромагнитных помех.

Таким образом, характеристики проводного канала связи в ССНЭКД удовлетворяют характеристики FTP (F/UTP) (*Foiled Twisted Pair*) – фольгированной витой пары, имеющей один внешний общий защитный слой из фольги. При этом известно, что даже неэкранированная витая пара UTP (U/UTP) (*Unshielded Twisted Pair*) по стандарту $UTP-6$ обеспечивает скорость передачи до 10 Гб/с на расстояние до 100 м [15].

Что касается беспроводного канала связи, то необходимую скорость передачи данных ССНЭКД обеспечивает стандарт беспроводной связи, осу-

пеществляющий обмен данными между устройствами на основе ультракоротких радиоволн BLE 5.0 (до 50 Мбит/сек с поддержкой EDR – enhanced data rate) [16].

Особенностям реализации помехоустойчивых аппаратных интерфейсов посвящены работы [17-19].

Соотношение характеристик каналов связи (КС) ССНЭКД и стандартов для реализации КС проводной UTA-6 и беспроводной связи BLE 5.0 соответственно приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Соотношение характеристик каналов связи

Канал связи (КС)	Ширина полосы КС ΔF (Гц)	Пропускная способность КС (Мбит/с)	Коэффициент затухания (дБ/м)	Надёжность КС
ССНЭКД	от 0,05 до 800	6,4	–	10 ⁻⁸
UTA-6	от 0,02 до 10 ⁸	1000	2,1/100м	10 ⁻⁸
BLE 5.0	от 0,02 до 10 ⁹	48	Выходная мощность +20	10 ⁻⁹

Из анализа таблицы 1 следует, что проводной UTA-6 и беспроводной каналы связи BLE 5.0 удовлетворяют требованиям, предъявляемым к проводному и беспроводному каналам связи ССНЭКД соответственно.

Построение многопоточных приложений. При работе с потоковыми интерфейсами (с последовательностью байтов) со стороны сервера ССНЭКД в языках программирования существует абстрактный класс *Stream*, при реализации производного от него класса, необходимо реализовать методы со следующими сигнатурами, приведенными на листинге [17] (рис. 8).

Сигнатуры методов чтения и записи данных для различных интерфейсов представлены на рисунке 9. При этом основная задача заключается в организации программы таким образом, чтобы данные непрерывно считывались, непрерывно отправлялись, непрерывно расшифровывались, а приложение должно реагировать на пользовательский интерфейс.

```
public void Write (byte[] buffer, int offset, ref int count);
public int Read (byte[] buffer, int offset, ref int count);
```

Рисунок 8 – Сигнатура методов абстрактного класса для взаимодействия с потоковым интерфейсом

Автором разработана тестовая программа, позволяющая оценить время обработки ЭКС в однопоточном и многопоточном режимах. На рисунке 9 приведён пример работы с последовательным выполнением всех операций, общее время составило 403мс. При многопоточной обработке ЭКС (рис. 10)

после сбора и помехоустойчивой обработки информации действия построение цифрового двойника сердца, обработка пользовательского интерфейса и определение электрофизиологических характеристик сердца выполняются параллельно. Многопоточная обработка ЭКС в среднем занимает 179 мс.

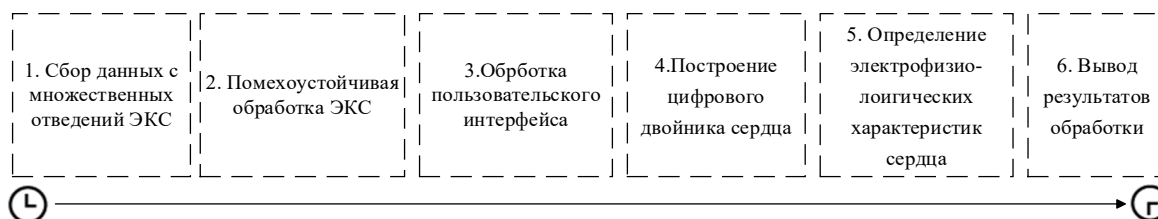


Рисунок 9 – Обработка ЭКС в однопоточном режиме

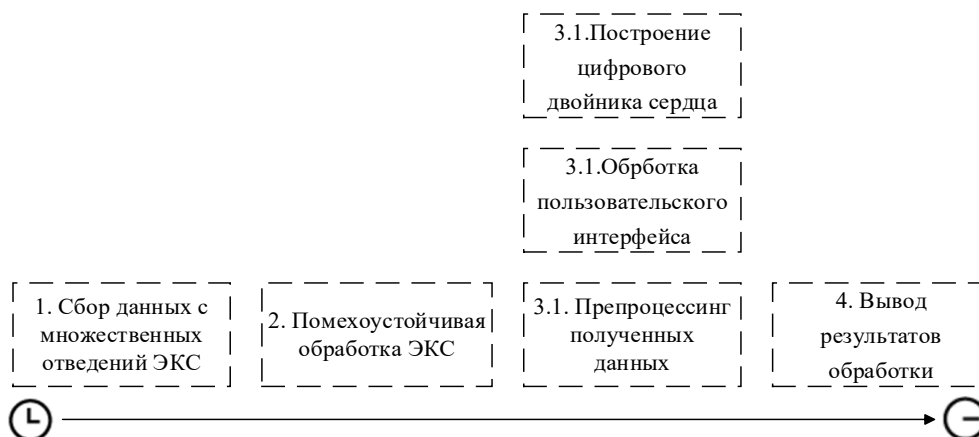


Рисунок 10 – Обработка ЭКС в многопоточном режиме

Обсуждение. В разработанной клиент-серверной структуре ССНЭКД на основе множественной регистрации электрокардиосигналов реализована возможность помехозащищённой передачи данных с модуля регистрации множественных отведений ЭКС (клиентская часть, рис. 1) на сервер, реализованном на персональном компьютере, для отображения какой-либо информации, диагностики, конфигурирования и других опций.

Наиболее популярными интерфейсами для

связи радиоэлектронного устройства с ПК являются *Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, USB, COM*. Несмотря на многообразие интерфейсов связи (табл. 1), взаимодействие с ними со стороны персонального компьютера имеет много общего.

На рисунке 11 представлена структурная схема системы, использующей набор универсальных методов для работы с интерфейсами, встраиваемое устройство, приложение с многопоточной архитектурой.

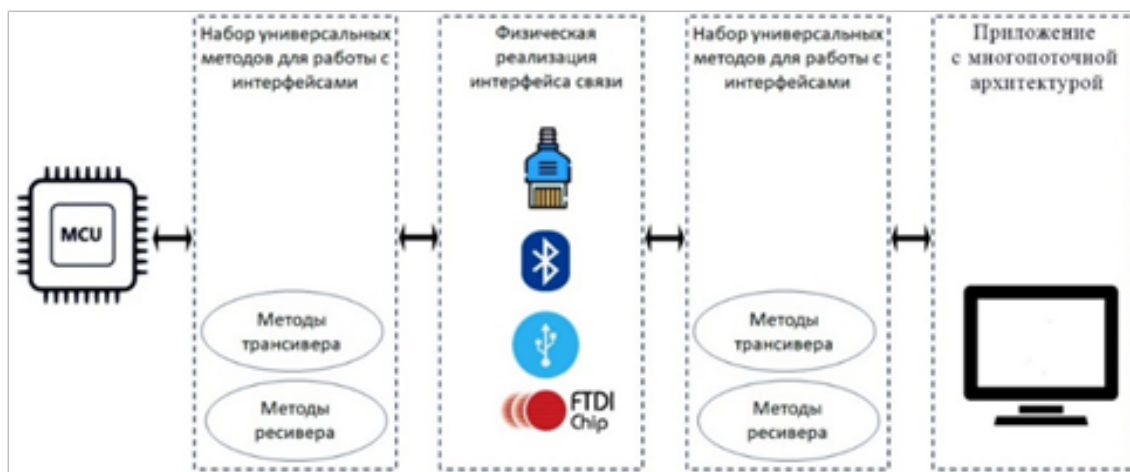


Рисунок 11 – Структура системы с использованием универсальных интерфейсов и многопоточной обработки

Структура системы на рисунке 11 позволяет реализовать универсальное приложение, работающее с большинством последовательных интерфейсов, а многопоточная архитектура позволяет экономить временные затраты.

Таким образом, функционирование клиент-серверной структуры ССНЭКД, реализующей многопоточные приложения, работающие с последовательными данными, осуществляется следующим образом:

1. Сбор данных со всех электродов.
2. Помехоустойчивая обработка.
3. Обработка пользовательского интерфейса.
4. Построение цифрового двойника сердца.
5. Определение электрофизиологических характеристик сердца.
6. Вывод результатов.

Выводы. Разработанная клиент-серверная структура скрининговой системы неинвазивной электрокардиодиагностики на основе множественной регистрации электрокардиосигналов позволяет своевременно выявлять сердечно-сосудистые заболевания. Применение методов теории помехоустойчивого кодирования позволяет при передаче пакетов данных электрокардиосигналов множественных отведений по беспроводному каналу связи оптимизировать процессы передачи и обработки за счет изменения параметров кодирования и обработки; сократить время обработки данных за счет многопоточности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Программно-аппаратный комплекс для неинвазивного электрофизиологического исследования сердца на основе решения обратной задачи электрокардиографии / Бокерия Л.А., Ревиншвили Ф.Ш., Калинин Ф.В., Калинин В.В., Лядкина О.С., Фетисова Е.А. // Мед.техн. – 2009. – №6 – С. 1-7.
2. Полякова И.П. Поверхностное ЭКГ-картирование как метод диагностики нарушений ритма сердца / Глава 6 в монографии «Неинвазивная диагностика в клинической аритмологии» // М.: Медицина, 2009, С. 157-175.
3. Istomina T.V. IOT intelligent system for medical control of the state of operators during their professional activity in extreme situations / Istomina T.V, Petrunina E.V, Istomin V.V, Trub N.V // AIP Conference Proceedings – 2021. – Т. 2389.
4. Visualization of a Digital Twin of the Heart / Bodin A.Y., Bodin O.N., Chekaikin S. V, Rakhmatullov F.K., Rakhmatullov R.F., Kramm M.N. // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM – 2021. – Т. 2021- June – С.419-423.
5. Компьютерные сети, принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер // СПб.: Питер, 2021. – 1008с.
6. ISO/IEC 7498-1:1994 Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The basic model / <https://www.iso.org/standard/20269.html>.
7. Помехоустойчивое кодирование в современных форматах связи / А.С. Костюков, А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, И.С. Бобылкин, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – Т. 14. – № 2. – 2019. – С. 132-138.
8. Квашенников В.В., Кухарев А.Д. Адаптивное помехоустойчивое кодирование в технике связи. Монография. – Калуга: Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2007. – 148с.
9. Золотарёв В.В., Зубарев Ю.Б., Овечкин Г.В. Многопороговые декодеры и оптимизационная теория кодирования / Под ред. академика РАН В.К. Левина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 239 с.
10. ГОСТ Р МЭК 870-6-1-98 / Устройства и системы телемеханики / Протоколы телемеханики, совместимые со стандартами ИСО и рекомендациями ITU-T / Среда

пользователя и организация стандартов // ГОССТАНДАРТ РОССИИ, М.: 1998, 35с.

11. Официальный сайт сообщества Bluetooth \ Объяснения Bluetooth Core 5.0[Электронный ресурс].URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-0/>.

12. Официальный сайт компании Texas Instrument/ Специализированные АЦП / ADS1298 / Datasheet [Электронный ресурс].URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1298.pdf>.

13. Балашов Ю., Козлов Д., Костин А. / Новости микроэлектроники / Проектирование регистраторов электрокардиосигнала для системы дистанционного мониторинга электрокардиограмм [Электронный ресурс] URL: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/03_08/9.html.

14. Обеспечение электромагнитной совместимости в системе регистрации множественных отведений электрокардиосигнала / Батяев А.С., Бодин О.Н., Чыонг Т.Л.Н., Крамм М.Н., Бодин А.Ю. / Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2023. – № 2 (44). – С. 89-96.

15. John Schmidt / Twisted pair, optical fiber or wireless—first examine the pros and cons of each / Reprinted with permission from March / April 2007 BICSI News.

16. Официальный сайт сообщества Bluetooth \ Объяснения Bluetooth Core 5.0[Электронный ресурс].URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-0/>.

17. Гук М. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2002. – 997 с.

18. Тишков В.В., Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н. Обоснование облика построения перспективных комплексов и средств связи на основе опыта организации связи при проведении специальной военной операции // Военная мысль. – 2023. – № 9. – С. 59-72.

19. Многопоточный интерфейс для считывания данных при многоканальной обработке электрокардиосигналов / Бодин А.Ю. / В сборнике: Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2023. Сборник трудов XXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань, 2023. – С. 199-202.

Статья поступила в редакцию 02.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 681.3

EDN: EKKWZP

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ПАРАЛЛЕЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОЙ ПАМЯТИ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ БЫСТРОГО УМНОЖЕНИЯ КВАДРАТНЫХ БИНАРНЫХ МАТРИЦ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7288-8553

AuthorID: 1286755

ORCID: 0009-0004-6081-0395

БОЛГАК Алексей Владимирович, аспирант кафедры вычислительной техники

Юго-Западный государственный университет

(305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, aleksei.bolgack@yandex.ru)

SPIN: 1273-2523

AuthorID: 510807

ORCID: 0000-0002-7362-7387

ВАТУТИН Эдуард Игоревич, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры вычислительной техники

Юго-Западный государственный университет

(305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, evatutin@rambler.ru)

Аннотация. В данной статье рассматриваются матричные умножения в задаче поиска транзитивного замыкания бинарного отношения, обладающего свойством транзитивности, а также построения матрицы достижимости и контрдостижимости в графах общего вида. Приведены примеры ориентированных и неориентированных графов, а также примеры построения по данным графам матриц смежности и инцидентности. Отмечены основные свойства бинарных отношений. Рассмотрены специальные виды графов для описания последовательных и параллельных алгоритмов логического управления, сферы их применения, а также описаны основные свойства параллельных граф-схем алгоритмов. Выполнен анализ подходов к практической реализации в задаче поиска транзитивного замыкания бинарного отношения: алгоритмы Флойда-Уоршелла и возведения матрицы смежности в степень до тех пор, пока она не перестанет изменяться. Рассмотрена проблема обработки больших (тысячи элементов) граф-схем алгоритмов на процессоре (CPU) и основные методы оптимизации матричных вычислений на программном (алгоритмическом) и аппаратном уровне. Выделены основные виды цифровых устройств, основанных на принципе параллельно-конвейерной обработки данных, указаны их достоинства и недостатки. Предложено систолическое устройство для быстрого умножения квадратных бинарных матриц размером $n \times n$, отличительной особенностью которого является конвейеризация операции чтения данных из специализированной многопортовой памяти. Разработана его математическая модель и структурно-функциональная организация параллельно-конвейерной памяти. Предложенная в работе структурно-функциональная организация специализированной многопортовой конвейерной памяти обеспечивает темп чтения данных, не зависящий от размера обрабатываемых матриц. При несколько большей аппаратной сложности по сравнению с аналогами устройство обеспечивает умножение квадратных бинарных матриц размером $n < 2000$ до 200 раз быстрее, что является существенным преимуществом при его построении в полужаказном исполнении с использованием программируемых логических интегральных схем (FPGA) или в заказном исполнении на базе интегральных схем специального назначения (ASIC).

Ключевые слова: умножение, бинарная матрица, граф, бинарное отношение, математическая модель, параллельно-конвейерная память, многопортовая память.

**MATHEMATICAL MODEL AND STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ORGANIZATION
OF PARALLEL-PIPELINE MEMORY OF A DEVICE FOR FAST MULTIPLICATION
OF SQUARE BINARY MATRICES**

© The Author(s) 2025

BOLGAK Aleksei Vladimirovich, postgraduate student of the Department of Computer Engineering

Southwest State University

(305040, Russia, Kursk, 50 let Oktyabrya str., 94, aleksei.bolgack@yandex.ru)

VATUTIN Eduard Igorevich, doctor of technical sciences, associate professor,

professor of the Department of Computer Engineering

Southwest State University

(305040, Russia, Kursk, 50 let Oktyabrya str., 94, evatutin@rambler.ru)

Abstract. This article discusses matrix multiplications in the problem of searching for a transitive closure of a binary relation with the transitivity property, as well as constructing a reachability and counter-reachability matrix in graphs of general form. Examples of oriented and undirected graphs are given, as well as examples of constructing adjacency and incidence matrices based on these graphs. The main properties of binary relations are noted. Special types of graphs

for describing sequential and parallel logic control algorithms, their fields of application are considered, and the main properties of parallel graph schemes of algorithms are described. The analysis of approaches to practical implementation in the problem of searching for the transitive closure of a binary relation is performed: Floyd-Warshall algorithms and exponentiation of the adjacency matrix until it ceases to change. The problem of processing large (thousands of elements) graph schemes of algorithms on a processor (*CPU*) and basic optimization methods of matrix calculations at the software (algorithmic) and hardware levels are considered. The main types of digital devices based on the principle of parallel-pipeline data processing are highlighted, their advantages and disadvantages are indicated. A systolic device for fast multiplication of square binary matrices of size $n \times n$ is proposed, the distinctive feature of which is pipelining the operation of reading data from a specialized multiport memory. Its mathematical model and the structural and functional organization of parallel-pipeline memory have been developed. The structural and functional organization of the specialized multiport pipelining memory proposed in the work ensures the data reading rate, independent of the size of the processed matrices. With a slightly higher hardware complexity compared to its analogues, the device provides multiplication of square binary matrices with a size $n < 2000$ of 200 times faster, which is a significant advantage when it is built in a semi-custom design using programmable logic integrated circuits (*FPGA*) or in a custom design based on special-purpose integrated circuits (*ASIC*).

Keywords: multiplication, binary matrix, graph, binary relation, mathematical model, parallel-pipelined memory, multiport memory.

Для цитирования: Болгак А.В. Математическая модель и структурно-функциональная организация параллельно-конвейерной памяти устройства для быстрого умножения квадратных бинарных матриц / А.В. Болгак, Э.И. Ватутин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 27-34. – EDN: EKKWZP.

Введение. В основе многих сложных вычислительно задач лежит матричное умножение, определяющее скорость их решения. Для матричных вычислений используется большое количество различных программных реализаций с различным набором алгоритмических и низкоуровневых оптимизаций (оптимизация работы кэш-памяти *CPU* [1-3], векторизация [4, 5], многопоточные программные реализации, *CUDA*- и *OpenCL*-ориентированные программные реализации [6-8], их комбинации с использованием интерфейса *MPI*). При решении ряда задач в области дискретной математики возникает необходимость в умножении бинарных матриц. К ним можно отнести задачи построения матрицы достижимости и контрдостижимости в графах общего вида [9], а также поиска транзитивного замыкания бинарного отношения, обладающего свойством транзитивности [10]. Графы общего вида разделяются на две группы: неориентированные (рис. 1) и ориентированные (рис. 2).

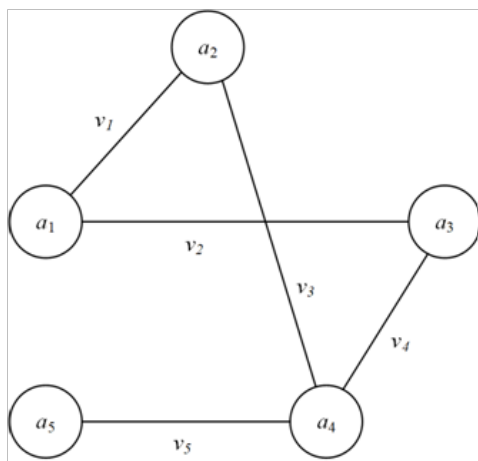


Рисунок 1 – Пример неориентированного графа общего вида

При работе с невзвешенными графами данные об их вершинах и ребрах хранятся в виде матриц смежности M_A (табл. 1, 4) и инцидентности M_I (табл. 2, 3, 5, 6), которые являются бинарными.

Таблица 1 – Пример матрицы смежности неориентированного графа, приведенного на рисунке 1

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
a_1	0	1	1	0	0
a_2	1	0	0	1	0
a_3	1	0	0	1	0
a_4	0	1	1	0	1
a_5	0	0	0	1	0

Таблица 2 – Пример матрицы инцидентности неориентированного графа, приведенного на рисунке 1, в виде списка инцидентных вершин

Ребро	$a_{нач}$	$a_{кон}$
v_1	a_1	a_2
v_2	a_1	a_3
v_3	a_2	a_4
v_4	a_3	a_4
v_5	a_4	a_5

Таблица 3 – Пример матрицы инцидентности неориентированного графа, приведенного на рисунке 1, в виде прямоугольной бинарной матрицы

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
v_1	1	1	0	0	0
v_2	1	0	1	0	0
v_3	0	1	0	1	0
v_4	0	0	1	1	0
v_5	0	0	0	1	1

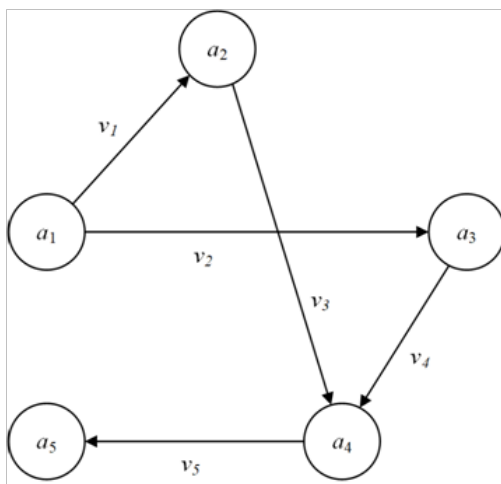


Рисунок 2 – Пример ориентированного графа общего вида

Таблица 4 – Пример матрицы смежности ориентированного графа, приведенного на рисунке 2

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
a ₁	0	1	1	0	0
a ₂	0	0	0	1	0
a ₃	0	0	0	1	0
a ₄	0	0	0	0	1
a ₅	0	0	0	0	0

Таблица 5 – Пример матрицы инцидентности ориентированного графа, приведенного на рисунке 2, в виде списка вершин

Дуга	a _{нач}	a _{кон}
v ₁	a ₁	a ₂
v ₂	a ₁	a ₃
v ₃	a ₂	a ₄
v ₄	a ₃	a ₄
v ₅	a ₄	a ₅

Таблица 6 – Пример матрицы инцидентности ориентированного графа, приведенного на рисунке 2, в виде прямоугольной матрицы

	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
v ₁	1	-1	0	0	0
v ₂	1	0	-1	0	0
v ₃	0	1	0	-1	0
v ₄	0	0	1	-1	0
v ₅	0	0	0	1	-1

Связность вершин графа может быть рассмотрена с позиции бинарных отношений. Известны следующие свойства бинарных отношений [9]:

- транзитивность ($\forall x, y, z \in S: xRy, yRz \Rightarrow xRz$);
- рефлексивность ($\forall x \in S: xRx$);
- симметричность ($\forall x, y \in S: xRy \Rightarrow yRx$).

При работе с бинарными отношениями, обладающими свойством транзитивности, одной из задач ставится задача поиска транзитивного замыкания бинарного отношения. Для приведенных выше

примеров графов ее решение соответствует построению матрицы достижимости, для неориентированного графа (рис. 1) она имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$M_A \quad M'_A = M_A \vee M_A^2 \quad M''_A = M'_A \vee (M'_A)^2$

Пример нахождения транзитивного замыкания отношения связи для ориентированного графа, приведенного на рисунке 2, приведен ниже:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$M_A \quad M'_A = M_A \vee M_A^2 \quad M''_A = M'_A \vee (M'_A)^2$

По матрице достижимости возможно построение матрицы контрдостижимости с использованием формулы $M_C = M''_A \wedge (M''_A)^T$.

Кроме того, существуют специальные виды графов. Например, известно формализованное описание класса последовательных [11] и параллельных алгоритмов логического управления [12]. Графы данного вида применяются в математике и программировании для наглядного отображения логики работы программы, а также при проектировании логических мультиконтроллеров.

При работе с граф-схемами параллельных алгоритмов используются следующие бинарные отношения (табл. 7).

Таблица 7 – Бинарные отношения граф-схем параллельных алгоритмов и их свойства

Бинарное отношение	Свойство
Связи (φ)	Рефлексивность, симметричность
Следования (υ)	Антирефлексивность, несимметричность, транзитивность
Параллельности (ω)	Рефлексивность, симметричность, нетранзитивность
Альтернативы (ψ)	Антирефлексивность, симметричность, нетранзитивность

Введенная система бинарных отношений характеризуется следующими свойствами [12]:

$$v \subset \varphi, \quad (1)$$

$$a_i \varphi a_j \Leftrightarrow a_i = a_j \vee a_i \vee a_j \vee a_j \vee a_i, \quad (2)$$

$$\varphi \cup \psi \cup \omega = A \times A, \quad (3)$$

$$\varphi \cap \psi = \emptyset, \psi \cap \omega = \emptyset, \varphi \cap \omega = \emptyset, \quad (4)$$

$$a_i \eta_1 a_j \Leftrightarrow \neg a_i \eta_2 a_j \wedge \neg a_i \eta_3 a_j, \quad (5)$$

$$\eta_1, \eta_2, \eta_3 \in \varphi, \psi, \omega, \eta_1 \neq \eta_2, \eta_1 \neq \eta_3, \eta_2 \neq \eta_3$$

На рисунке 3 представлен пример последовательного алгоритма и отношения альтернативы между парами вершин $a_4 \psi a_5$ и $a_4 \psi a_6$, а на рисунке 4 – пример параллельной граф-схемы алгоритма и отношения параллельности между парами вершин $a_1 \omega a_2, a_1 \omega a_3$.

Чтобы найти бинарное отношение достижимости в графах общего вида необходимо выполнить

транзитивное замыкание для отношения следования, после чего можно определить отношение связи. Далее определяется отношение альтернативы на базе построения путей в составе соответствующих альтернативных ветвлений. После определения названных отношений становится возможным выяснение отношения параллельности в соответствии с (5). Наиболее трудоемким из вышеперечисленного является этап транзитивного замыкания отношения следования.

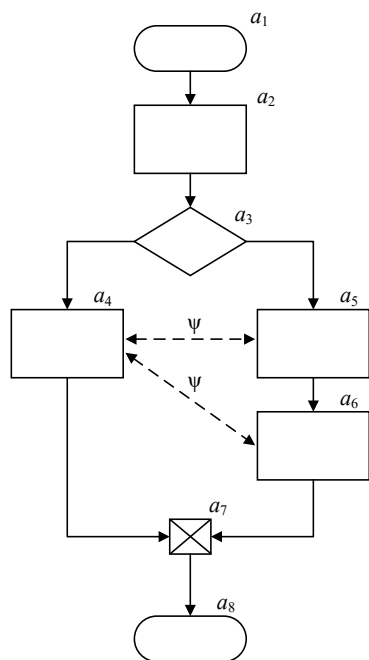


Рисунок 3 – Пример граф-схемы алгоритма

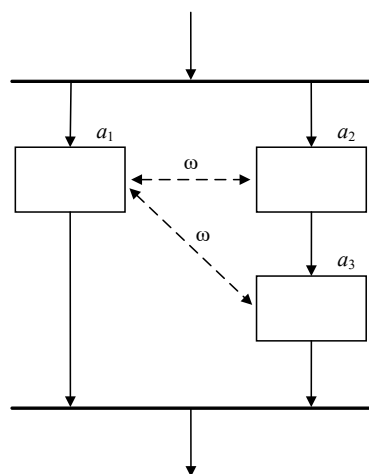


Рисунок 4 – Пример граф-схемы параллельного алгоритма

Методология. К практическому решению задачи поиска транзитивного замыкания бинарного отношения реализуются два подхода. Первый из них основывается на алгоритме Флойда-Уоршелла [13, 14], в соответствии с которым реализуется особый порядок рассмотрения элементов матриц, позволяющий найти матрицу достижимости за один проход. Это является ключевым преимуществом

данного алгоритма, но, наряду с этим, ему свойственен недостаток, связанный с тем, что алгоритм Флойда-Уоршелла нельзя распараллелить, поскольку он зависит от порядка выполнения операций умножения. Временная асимптотика алгоритма Флойда-Уоршелла составляет величину $O(n^3)$. Второй подход основан на возведении матрицы смежности в квадрат до тех пор, пока она не перестанет изменяться. Результирующее значение матрицы, обладающей свойством транзитивного замыкания, будет получено в худшем случае за $\lceil \log_2 n \rceil$ шагов (возведений матрицы в квадрат), а временная асимптотика алгоритма составит величину $O(n^3 \log n)$. Следовательно, временные затраты у данного подхода выше, чем у алгоритма Флойда-Уоршелла, однако такой алгоритм допускает распараллеливание, так как не связан с порядком выполняемых операций.

Обработка больших (тысячи элементов) граф-схем алгоритмов на современных CPU достигает нескольких минут. Для оптимизации матричных вычислений используют программный и аппаратный методы. При программной реализации применяют базовый подход к умножению матриц – классическое умножение. Данный подход достаточно прост, однако неэффективен, когда размер матриц превышает объем кэш-памяти CPU. В связи с этим на практике применяются различные алгоритмические подходы, позволяющие снизить число промахов кэша CPU и увеличить реальную производительность вычислительной системы. Так умножение с буферизацией j -го столбца или блочное умножение позволяют эффективно использовать кэш-память CPU [3]. Еще одним известным направлением для снижения временных затрат на матричные вычисления является умножение матриц на графических процессорах с разделяемой памятью (GPU) в рамках концепции GPGPU. Использование параллельных программных реализаций, ориентированных на использование технологий CUDA, OpenCL, STREAM для GPU [6-8] позволяют также повысить реальную производительность вычислительной системы. В случае, если на программном уровне время выполнения операции умножения матриц оказывается неприемлемо долгим, то оправдан перенос данной операции на аппаратный уровень. Различные подходы к аппаратной реализации умножения матриц могут быть разделены на три основные группы (табл. 8).

В устройстве-прототипе [22] была предложена соответствующая структурно-функциональная организация многопортовой памяти, обеспечивающая чтение $2n$ пар коэффициентов матриц в каждом такте, что значительно превосходит возможности классической памяти (DDR или GDDR), обеспечивающей чтение только одного операнда за такт. В ходе оценки его быстродействия [23] было выявлено, что с увеличением размера обрабатываемых матриц ($n > 64$) время работы устройства (конвейерный такт) по-прежнему лимитируется темпом поступления данных из памяти.

Таблица 8 – Виды устройств умножения матриц и их описание

Группа	Описание
Оптические устройства [15-17]	Устройства данной группы в настоящее время не используются в вычислительной технике
Устройства, основанные на аналоговых вероятностных принципах обработки сигналов [18]	Отсутствие строгого соответствия стандартам представления чисел с плавающей запятой (IEEE 754) и низкая точность вычислений устройств данной группы ограничивают их применение в современных практических задачах
Цифровые устройства с параллельно-конвейерной архитектурой [19-21]	В основу устройств данной группы заложен принцип параллельной и конвейерной обработки данных. Операция умножения матриц, занимающая значительное время при последовательной обработке, выполняется за линейное время на устройствах данной группы, что обеспечивает существенный выигрыш в производительности

Результаты. На основании выполненного анализа предложено устройство для умножения квадратных бинарных матриц (рис. 5, 6), работа которого основана на систолическом принципе умножения. Особенностью данного устройства является конвейеризация операции чтения данных из памяти.

На рисунке 6 приведена функциональная схема предложенного устройства, включающая в себя $n \times n$ операционных блоков (где n – размер перемножаемых квадратных матриц), блоки коэффициентов матриц 2, 3, сдвиговый регистр 4, группу из n двухступенчатых регистров 5. Схема операционного блока устройства (рис. 5) состоит из двухступенчатых триггеров 6, 7, 8, логических элементов ИЛИ 10, 13, логических элементов И 9, 11, 12, инвертора 14. Схема блока коэффициентов матрицы устройства

(одна ячейка для хранения одного коэффициента матрицы в рамках многопортовой памяти) (рис. 7) содержит $n \times n$ блоков хранения 15, два группы из $(n - 1)$ двухступенчатых регистров 39, 40, группу из $n \times n$ двухступенчатых триггеров 41, группу из $n \times (n - 1)$ логических элементов ИЛИ 42. Схема блока хранения одной ячейки памяти устройства (специализированная конвейерная многопортовая память) (рис. 8) состоит из триггера 16, логического элемента И 17, группы из n элементов И 18, группы из n элементов ИЛИ 19, блоков из n двухступенчатых триггеров 28, 29, 30.

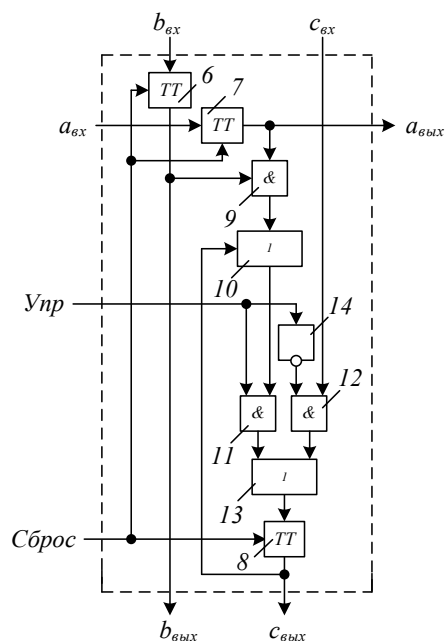


Рисунок 5 – Схема операционного блока предложенного устройства

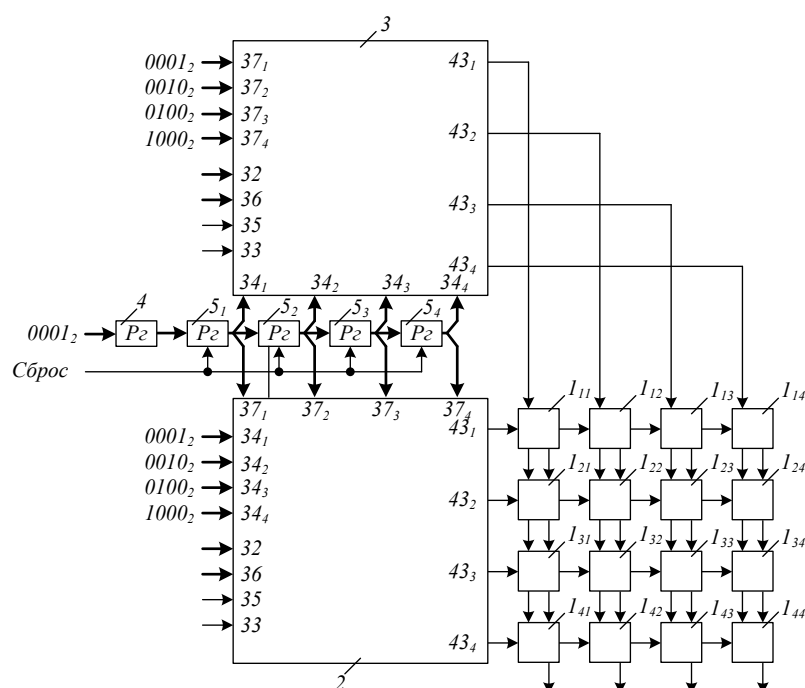


Рисунок 6 – Функциональная схема предложенного устройства

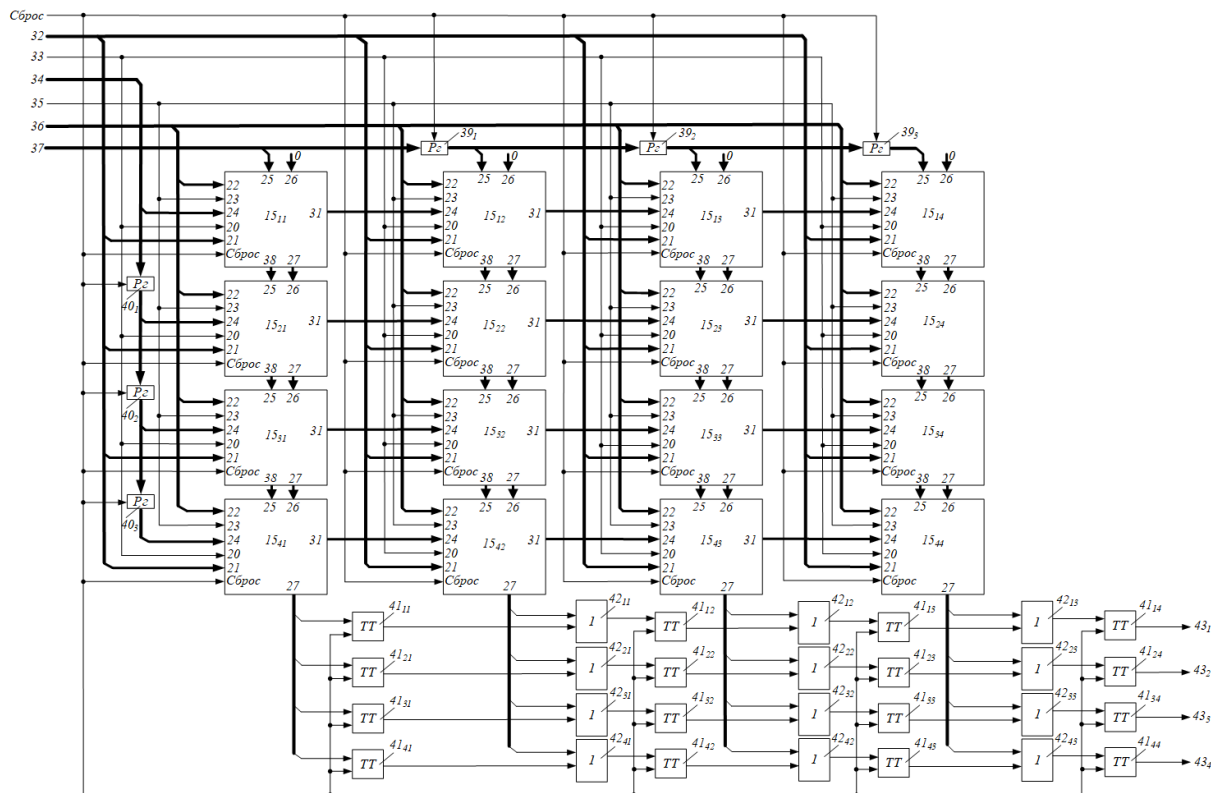


Рисунок 7 – Схема блока коэффициентов матрицы предложенного устройства

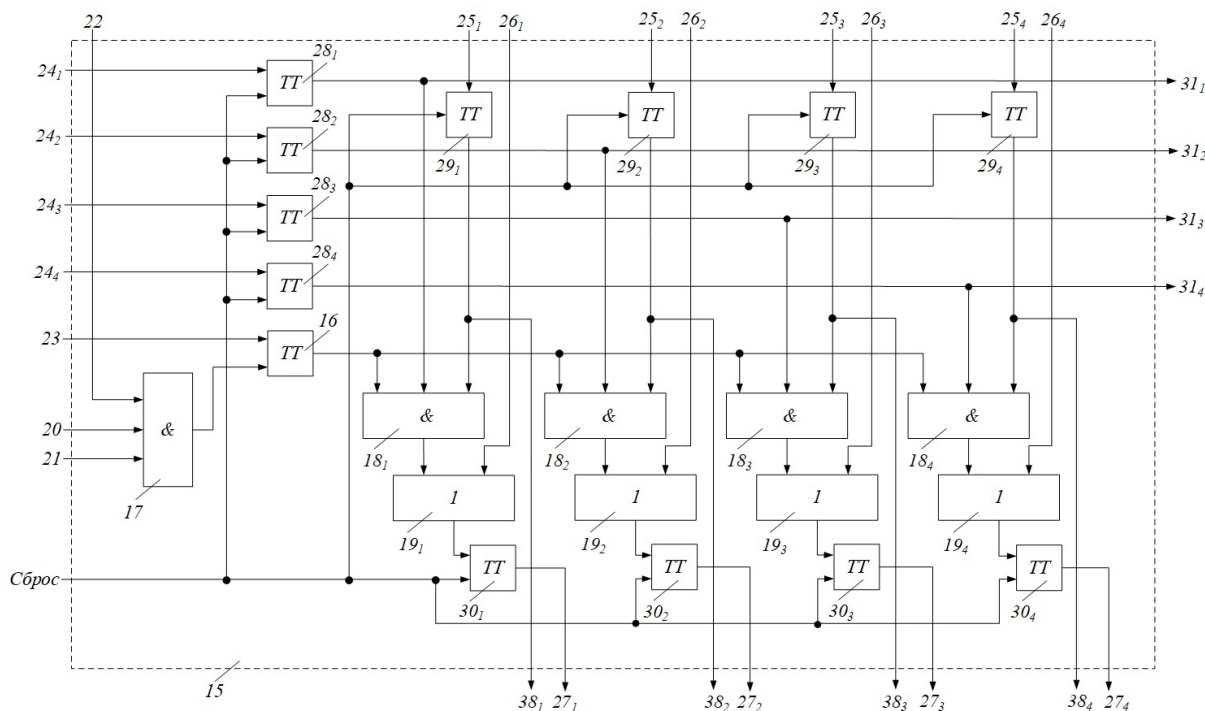


Рисунок 8 – Функциональная схема блока хранения предложенного устройства

Обсуждение. Опишем математическую модель организации специализированной многопортовой конвейерной памяти (рис. 7), включающей в своем составе $n \times n$ блоков хранения (рис. 8). Предложенная специализированная память устройства работает в соответствии со следующей математической моделью:

$$Pz\ 39_i^{(t)} := Pz\ 39_{i-1}^{(t-1)}, i = \overline{2, n}, \quad (6)$$

$$Pz\ 40_j^{(t)} := Pz\ 40_{j-1}^{(t-1)}, j = \overline{2, n}, \quad (7)$$

$$TT\ 29_k^{(t)}[i, j] := TT\ 29_k^{(t-1)}[i, j-1], i = \overline{1, n}, j = \overline{2, n}, k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$TT\ 28_k^{(t)}[i, j] := TT\ 28_k^{(t-1)}[i-1, j], i = \overline{2, n}, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, n}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} TT30_k^{(t)}[i, j] &:= D[i, j] \& TT29_k^{(t)}[i, j] \& TT28_k^{(t)}[i, j] \vee \\ &\vee TT30_k^{(t-1)}[i-1, j], i = \overline{2, n}, \\ j &= \overline{1, n}, k = \overline{1, n}, \\ TT41_k^{(t)}[k, 1] &:= TT30_k^{(t-1)}[n, 1], k = \overline{1, n}, \\ TT41_k^{(t)}[k, j] &:= TT41_k^{(t-1)}[k, j-1] \vee TT30_k^{(t-1)}[n, j], \\ j &= \overline{2, n}, k = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $i, j = \overline{1, n}$ – номера текущего блока хранения, $k = \overline{1, n}$ – номер порта чтения, t – номер такта.

Формула (6) соответствует конвейерному принципу продвижения адресов по столбцам, формула (7) – конвейерному принципу продвижения адресов по строкам (адреса задаются в унитарном коде вида 00...01000...00, где единица соответствует номеру строки и/или столбца выбранного блока хранения). Формулы (8) и (9) соответствуют конвейерному движению указанных выше адресов в блоках хранения ячеек памяти, а формула (10) – чтению и последующему конвейерному продвижению данных из выбранного блока хранения вниз по столбцам. Формула (11) описывает дальнейшее конвейерное продвижение прочитанных данных на выход блока коэффициентов матрицы.

Выводы. Предложенная в работе структурно-функциональная организация специализированной многопортовой конвейерной памяти обеспечивает темп чтения данных, не зависящий в отличие от устройства-прототипа от размера обрабатываемых матриц.

По предварительным оценкам предложенное устройство с конвейеризацией операции чтения данных из специализированной многопортовой памяти несмотря на 9 раз большую аппаратную сложность по сравнению с устройством-прототипом способно обеспечить снижение временных затрат до 200 раз при умножении квадратных бинарных матриц размером $n < 2000$, что является существенным преимуществом при его построении на *FPGA* или *ASIC*. Путем незначительного изменения структуры блоков хранения предложенное устройство можно использовать для умножения матриц общего вида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кожин А.С. Методы оптимизации времени доступа в общий кэш многоядерного микропроцессора / А.С. Кожин, Ю.А. Недбайло // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 3. – С. 27-32.
2. Егунов В.А. О влиянии кэш-памяти на эффективность программной реализации базовых операций линейной алгебры / Егунов В.А. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2018. – № 3. – С. 88-96.
3. Болгак А.В. Оценка реальной производительности процессоров семейства Intel Core различных поколений в задаче умножения вещественных матриц для однопоточной программной реализации / Болгак А.В., Ватулин Э.И. // Облачные и распределенные вычислительные системы в электронном управлении. ОРВС – 2023: сборник трудов 4-й международной научно-технической конференции (28 ноября – 1 декабря 2023 года) / ред. кол.: И.И. Курочкин [и др.]; ИПС РАН. Переславль-Залесский. – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга». – 2024. – С. 98-100.
4. Ватулин Э.И. Оценка реальной производительности

современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 1) / Ватулин Э.И., Титов В.С. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – Т. 1. – № 4 (61). – С. 26-35.

5. Ватулин Э.И. Оценка реальной производительности современных процессоров в задаче умножения матриц для однопоточной программной реализации с использованием расширения SSE (часть 2) / Ватулин Э.И., Титов В.С. // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – Т. 1. – № 5 (62). – С. 8-16.

6. Ватулин Э.И. Оценка реальной производительности современных видеокарт с поддержкой технологии CUDA в задаче умножения матриц / Ватулин Э.И., Мартынов И.А., Титов В.С. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2014. – № 2. – С. 8-17.

7. Боресков А.В. Параллельные вычисления на GPU. Архитектура и программная модель CUDA: Учеб. пособие / Боресков А.В., Харламов А.А., Марковский Н.Д., Микушин Д.Н., Мортиков Е.В., Мыльцев А.А., Сахарных Н.А., Фролов В.А. Предисл.: Садовничий В.А. // М.: изд-во Московского университета, 2012. – 336 с.

8. Старовойтов И.Н. Параллельные вычисления на графических процессорах / Старовойтов И.Н., Ревняков Е.Н., Полякова Е.Н. // Первая Международная научная конференция по проблемам цифровизации: EDCRUNCH URAL – 2020: материалы конференции (Екатеринбург, 29-30 сентября 2020 г.); М-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. – 2020. – С. 314-319.

9. Зыков А. А. Основы теории графов / Зыков А. А. // М.: Наука. – 1986. – 384 с.

10. Ватулин Э.И. Построение матрицы отношений в задаче оптимального разбиения параллельных управляющих алгоритмов / Ватулин Э.И., Зотов И.В. // Известия Курского государственного технического университета, Курск. – 2004. – № 2. – С. 85-89.

11. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов (граф-схемы и автоматы) / С.И. Баранов. // Л.: Энергия. – 1979. – 232 с.

12. Зотов И.В. Организация и синтез микропрограммных мультимикроконтроллеров / Зотов И.В., Колосков В.А., Титов В.С., Сапронов К.А., Волков А.П. // Курск: ГУИПП «Курск». – 1999. – 368 с.

13. Левитин А.В. Глава 11. Преодоление ограничений: Метод деления пополам / Левитин А.В. // Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. – С.349-353.

14. Ismail H. Toroslu Improving The Floyd-Warshall All Pairs Shortest Paths Algorithm / Ismail H. Toroslu // Dept. of Computer Eng., METU, Ankara, Turkey. 4 Sep 2021. – P. 1-5. – DOI:10.48550/arXiv.2109.01872.

15. Гребнев А.К. Оптоэлектронные элементы и устройства / Гребнев А.К., Гридин В.Н., Дмитриев В.П.; Под ред. Гуляева Ю.В. // Издательство «Радио и связь». – 1998. – 336 с.: ил.

16. Юшин А.М. Справочник. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги / Юшин А.М. // Издательство «РадиоСофт». – Москва, 2000. – Т.1. – 512 с.

17. Белов П.А. Оптические процессоры: достижения и новые идеи / Белов П.А., Беспалов В.Г., Васильев В.Н., Козлов С.А., Павлов А.В., Симовский К.Р., Шполянский Ю.А. // В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. – СПб, 2006. – С. 6-36.

18. Плаксиенко В.С. Устройства приема и обработки сигналов: Учебное пособие для вузов / Плаксиенко В.С., Плаксиенко Н.Е., Плаксиенко С.В. Под ред. Плаксиенко В.С. // М.: Учебно-методический издательский центр «Учебная литература», 2004. – 376 с.: ил.

19. Одинец А.И. Цифровые устройства: АЦП и ЦАП: Учеб. пособие / Одинец А.И., Науменко А.П. // Омск: Изд-во ИРСИД. – 2006. – 48 с.

20. Gümüşkaya Haluk A parallel pipelined computer architecture for digital signal processing / Gümüşkaya Haluk, Örencik Bülent // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 1998. – Vol. 6. – No. 2. – Article 4. – P. 107-130. – URL: <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol6/iss2/4> (дата обращения: 13.02.2025).

21. Строгонов А.В. Основы цифровой обработки сигналов / Строгонов А.В. // Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». – 2014. – URL: <https://cchgeu.ru/upload/iblock/db0/osnovytsos.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).

22. Гвоздева С.Н. Устройство для умножения бинарных матриц / Гвоздева С.Н., Ватутин Э.И., Пшеничных А.О., Титов В.С. // Патент РФ на полезную модель № 193927. Заявл. 26.06.2019, опубл. 21.11.2019.

23. Гвоздева С.Н. Оценка быстродействия устройства с систолической структурой для умножения бинарных матриц / Гвоздева С.Н., Ватутин Э.И., Титов В.С. // Телекоммуникации. – Т. 3. – 2020. – С. 2-10.

Статья поступила в редакцию 31.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 65.011.56

EDN: VLSAPL

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 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. В статье рассматривается проблематика цифровой трансформации предприятий в условиях системного внедрения средств автоматизации и информационных технологий. Цель исследования – разработка функциональной модели информационно-ориентированного производства и создание на ее основе архитектуры системы автоматизации научной и технической подготовки производства (АСНИ и АСТПП). Для достижения поставленной цели используется методологический аппарат теории систем и теории автоматизированного управления. Архитектура системы АСНИ и АСТПП подразумевает применение регрессионно-корреляционного анализа и моделей машинного обучения. В рамках исследования показывается, что внедрение сквозных технологий Индустрии 4.0 значительно меняет парадигму организации и проектирования производства и технологических процессов. Рассматривается концепция поэтапной цифровой трансформации предприятия. Указывается, что в связи со смещением трудоемкости подготовки производства на этапы НИОКР, а также в связи с возросшей наукоемкостью современного производства наблюдается рост затрат на *R&D (research and development)* у ведущих зарубежных и отечественных производителей, при этом отмечается снижение эффективности современных исследований. Ввиду этого предлагается когнитивная модель человеко-машинного взаимодействия в процессах научной и технической подготовки производства с использованием технологий искусственного интеллекта. На основании этой модели предлагается архитектура и ряд методов по автоматизации задач научной подготовки производства. Применение указанных моделей и методов может значительно сократить трудоемкость этапов научно-технологической подготовки производства.

Ключевые слова: автоматизация, инжиниринг, цифровизация, нейронная сеть, глубокое обучение, машинное обучение, наука о данных, техническая подготовка производства, научная подготовка производства.

DIGITAL PRODUCTION FUNCTIONAL MODELLING

© The Author(s) 2025

SHAYKHULOVA Aygul Fazirovna, candidate of technical sciences, associate professor of «Aviation Engines»

Ufa University of Science and Technologies

(450076, Russia, Ufa, street Zaki Vakidi 32, e-mail: shaihulova@inbox.ru)

Abstract. The article addresses the problem of digital transformation of enterprises in the context of system automation and information technology. It is shown that the introduction of end-to-end Industry 4.0 technologies significantly changes the paradigm of organizing and designing production and technological processes. The concept of a step-by-step digital transformation of an enterprise is considered. It is indicated that due to the shift in the labor intensity of production preparation at the R & D stages, as well as due to the increased science intensity of modern production, there is an increase in R & D costs at leading foreign and domestic manufacturers. At the same time, there is a decrease in the effectiveness of modern research. In this regard, the authors are faced with the task of developing a functional model of information-oriented production and equipment engaged in scientific preparation of production (R & D). Based on these models, the article contains a cognitive model of human-machine interaction in the processes of scientific and technical preparation of production in the context of using artificial intelligence technology. Based on this model, a new architecture and a number of methods for automating the tasks of scientific preparation of production. It is argued that the use of these models and methods can significantly reduce the labor intensity of the stages of scientific and technological preparation of production.

Keywords: automation, engineering, digitalization, neural networks, deep learning, machine learning, data science, technical preparation of production, scientific preparation of production, research and development.

Для цитирования: Шайхулова А.Ф. Функциональное моделирование цифрового производства / А.Ф. Шайхулова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 35-42. – EDN: VLSAPL.

Введение. Интеллектуальные системы управления производством с использованием искусственного интеллекта обеспечивают устойчивое развитие производства в условиях жесткой конкуренции и неопределенности внешней среды предприятия. Показано [1], что на сегодняшний день трудоемкость постановки на производство новых изделий и освоения новых технологий в условиях применения цифровых систем проектирования смещается с этапа производства опытной партии изделий на этап НИОКР. Это подход к разработке автоматизированных производств резко отличается от традиционного, когда выявление ошибок проектирования и корректировка технологии производилась уже в процессе производства. Переход к автоматизированным системам технической подготовки производства и НИОКР дает возможность заменить натурные эксперименты математическим моделированием [2]. Широкое применение технологий искусственного интеллекта и больших данных способствует расширению функциональных возможностей автоматизированных средств проектирования, а применение технологий «блокчейн» позволяет управлять и цепочками поставок. Разработка и применение генеративных состязательных нейронных сетей открывает большие перспективы в части автоматизации сложно формализуемых задач НИОКР и технической подготовки производства. С уверенностью можно сказать, что сквозное внедрение цифровых технологий в производство и его системная автоматизация значительно меняют способы организации предприятия, методологию научной и технической подготовки производства [3, 4].

Сказанное позволяет констатировать ряд существенных обстоятельств [1-15]:

1) локальная автоматизация в настоящий момент не дает результатов, поскольку внедрение отдельных групп роботизированного оборудования сопряжено с возникновением узких мест, ввиду чего прирост в производительности может оказаться несущественным;

2) в связи с появлением многофункционального обрабатывающих центров и возросшей доступностью промышленных роботов и 3D-принтеров участки предметно-замкнутого типа стали заменяться так называемыми гибкими автоматизированными ячейками или (по-другому) ячейками серийного производства;

3) использование тяжелых CAD/CAM/CAE/PDM систем (*computer aided design/computer aided manufacturing/computer aided engineering/product data management*) в конгломерате с автоматизированным оборудованием, 3D-принтерами и пр. позволили изменить не только саму цепочку проектирования изделия, но и формат технологических процессов – в серийных производствах наблюдается концентрация операций, несколько операций на многоцелевом обрабатывающем центре объединяются в одну комплексную. Это с одной стороны повышает точность изготовления деталей, с другой – сокращает трудоемкость технологического процесса, повышает гибкость системы, а

также экономит производственные ресурсы;

4) системное внедрение цифровых средств проектирования позволяет перейти к использованию информационных моделей изделия и производственных процессов.

Цифровое производство основано на широком применении данных на всех этапах технологического процесса [1-5], в том числе на внедрении сквозных технологий Индустрии 4.0 – больших данных, искусственного интеллекта, облачных технологий и блокчейна. Внедрение этих технологий в имеющиеся системы автоматизации производства означает информационный подход к управлению.

Системное управление производственной системой в условиях применения цифровых технологий предполагает ряд существенных изменений в условиях современных производств [1-15]:

1) для адаптации к резким изменениям рынка производство не только должно быть гибким, оно должно уметь предугадывать эти изменения (внедрение предиктивной аналитики, использование информационных моделей – цифровых двойников);

2) массовое производство сменяется массовой кастомизацией продукции, что требует создания и исследования информационных моделей изделия, клиента, цифровых систем (*ERP – electronic planning systems, PLM – product life management*).

Это обуславливает сокращение сроков постановки на производство новых изделий и переноса трудоемкости этого процесса с этапов производства опытных партий изделий на НИОКР. В этой связи особенно важным становится внедрение средств моделирования процессов и объектов производства, в частности систем предиктивной аналитики для бизнес-процессов, сред имитационного моделирования для производственных процессов. Характерная черта Индустрии 4.0 – системно автоматизированное производство, на котором управление осуществляется в режиме реального времени с учетом меняющихся внешних условий, что требует новых подходов к моделированию производственной системы.

В настоящей статье предлагается функциональная модель информационно-ориентированного производства и на ее основе разрабатывается архитектура системы автоматизации научной и технической подготовки производства с использованием технологий машинного обучения. Для этого анализируется проблематика изменения методологии научной и технической подготовки производства в связи с необходимостью сквозного внедрения цифровых технологий для управления информационно-ориентированным производством.

Методология. Рассмотрим базовые методы моделирования производственной системы. На сегодняшний день классической считается представленная на рисунке 1 функциональная модель жизненного цикла изделия [16], а для пояснения принципа системной автоматизации чаще всего используется ее пирамидальная интерпретация (рис. 2).

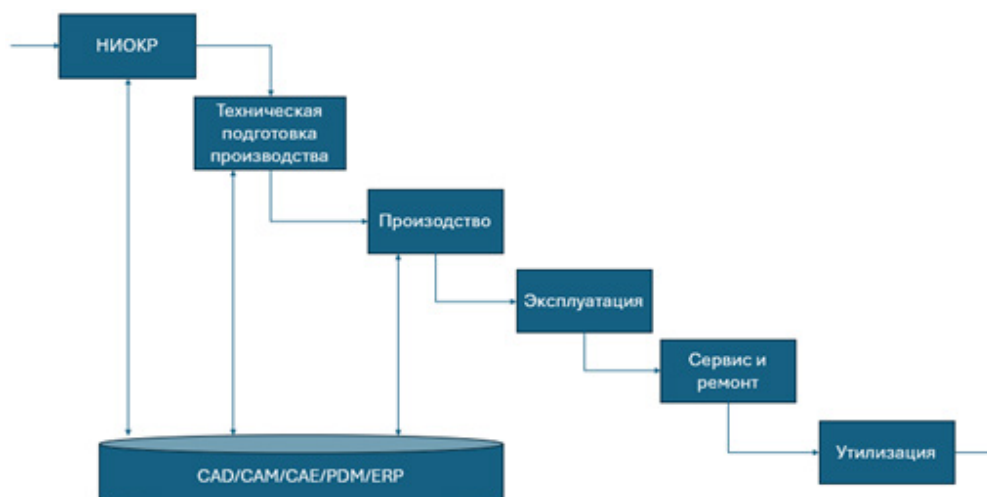


Рисунок 1 – Жизненный цикл изделия



Рисунок 2 – Уровни автоматизации производственной системы

Для производств "будущего" такая модель представляется примитивной, поскольку не предполагает применения технологий цифровых двойников, будущие производства нацелены на формирование так называемого континуума реальных физических объектов и процессов с виртуальными моделями (рис. 3), которые в процессе взаимодействия обмениваются информацией, что позволяет достичь лучших результатов проектирования. Данный подход позволит визуализировать процессы в режиме реального времени прогнозировать их ход в будущем, а также моделировать процессы и объекты априори.

Следовательно, пирамида на рисунке 2 уже несколько неполно отражает информационную среду «умного предприятия» (рис. 4) [1]. Развитие современного производства предполагает системное внедрение средств автоматизации и сквозное применение информационных технологий. При таком подходе будет меняться не только формат организации производства, но и подходы к проектированию. Очевидно, что переход от традиционных концепций

(рис. 1, 2) к формату организации (рис. 3, 4) – то, что и составляет цифровую трансформацию производства, не может быть осуществлен быстро. Поэтому по мнению одного из апологетов цифровизации производства Э. Филосом [1] оправдана концепция поэтапного перехода от традиционного производства к умному и затем уже – к виртуальному (рис. 5).

Таким образом можно сказать, что по пути производства от цифровой фабрики к виртуальной заключается в постепенном внедрении информационных моделей для обеспечения информационно обоснованного управления всеми этапами производства, включая цепочки поставок, а также для прогнозирования работы производственной системы за счет внедрения моделей регрессионного анализа и предиктивной аналитики, в частности цифровых двойников.

Отметим, что концепции виртуальных фабрик свойственна тенденция к созданию так называемого континуума информационных моделей и реальных объектов (рис. 6).

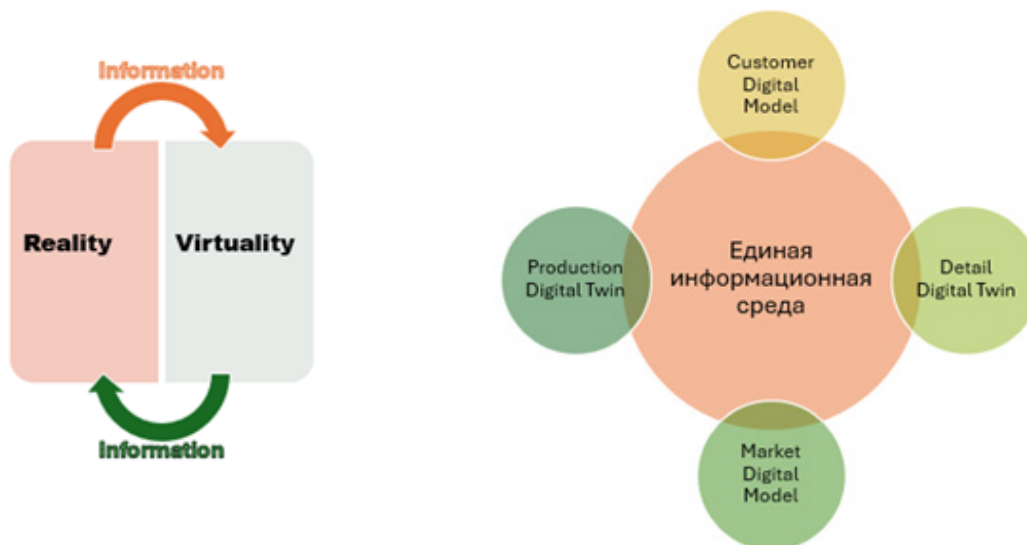


Рисунок 3 – Взаимодействие реальных физических объектов и виртуальных моделей

Рисунок 4 – Система цифровых двойников

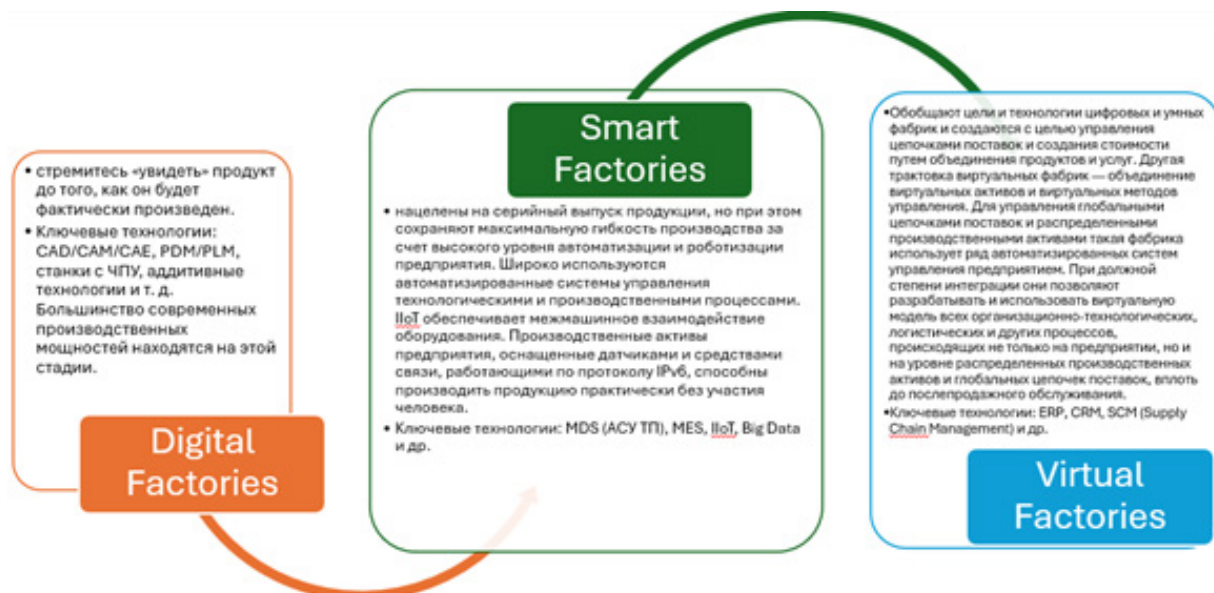


Рисунок 5 – Этапы цифровой трансформации производства



Рисунок 6 – Непрерывная модернизация производства по средствам освоения инноваций

Необходимость совершенствования применяемых технологий и методов организации производства требует расширения отделов предприятия, связанных с НИОКР (*R&D*), что обеспечивает устойчивое развитие современного производства на основе непрерывной модернизации, разработке и внедрения новых технологий. В этой связи наблюдается рост затрат на НИОКР у ведущих мировых компаний, на рис. 7 представлен для примера показан рост расходов на НИОКР компании Boeing. (по данным портала www.macrotrends.net). [17, 18]. При этом в работе [19] было отмечено интересное явление – с 1930-х годов число исследований в области органи-

зации производства выросло в десятки раз, но это не привело к аналогичному скачку экономической эффективности. Исследования становятся всё дороже, а их результативность уменьшается, для внедрения новых технологий требуется гораздо больше усилий, чем раньше. Наблюдается феномен снижающейся отдачи: исследований, результаты которых не приносят желаемого роста. Показатель производительности является решающим при оценке эффективности привлекаемых ресурсов для создания новых идей и технологий. Поэтому напрашивается вывод о необходимости разработки средств автоматизации *R&D*.



Рисунок 7 – Рост расходов на НИОКР у компании Boeing

Результаты. Результатом приведенного анализа стала функциональная модель информационно-ориентированного производства, которая отражает сквозное применение информационных моделей на всех производственных уровнях и этапах жизненного цикла изделия, а также функциональная модель подразделений научной подготовки производства (*research and development* – *R&D*), которая должна обеспечить устойчивое развитие производства и архитектура нейросетевой модели управления научной подготовкой производства. Также предложена когнитивная модель человеко-машинного взаимодействия в процессах научной и технической подготовки производства с использованием технологий искусственного интеллекта. Ниже представлены архитектуры этих систем, в других публикациях авторов можно найти примеры конкретной реализации модулей указанных систем.

На рисунке 8 представлена функциональная модель информационно-ориентированного производства. Ключевым моментом модели является сквозное применение информационных технологий, которое позволяет обоснованно принимать решения на уровне процессов. Модель разделена на три уровня: уровень физических объектов; уровень информационных моделей; уровень процессов. На первом уровне (реальных физических объектов) с помощью сенсоров и технологий *IoT* (*internet of things*) происходит сбор информации, обеспечивая формирование киберфизической системы, что является необходимым условием внедрения цифровых двойников. На втором уровне происходит агрегирование данных, их обработка и анализ. На этом уровне возможно внедрение цифровых двойников. Выше находится уровень специального программного обеспечения (ПО). На сегодняшний день техно-

логии цифровых двойников недостаточно развиты и можно говорить лишь о внедрении информационных моделей объектов, процессов и систем в виде программного обеспечения классов *CAD/CAM/CAE/ERP*. На верхнем уровне модели (уровне процессов) показаны этапы жизненного цикла изделия. Указанная информационная структура должна обеспечить сквозную поддержку всех этапов жизненного цикла изделия.

Можно заметить, что такая функциональная модель обеспечивает формирование континуума реальность-виртуальность и формирование единого информационного поля взаимодействия, представленные выше на рисунках 3, 4.

Для трансформации предприятия и его устойчивого развития необходимо развивать подразделения, которые занимаются постоянным мониторингом и анализом сведений об использовании продукции, производства и внедрением новых технологий для

устранения узких мест производства и улучшения качества изделий. Структура такого подразделения может иметь вид, показанный на рисунке 9.

На первом этапе происходит анализ основных трендов развития технологий, способных обеспечить стратегию инновационного толчка для предприятия. На основании этого анализа, а также обратной связи от производства, сервисных отделов предприятия об опыте эксплуатации и др. производится поиск и разработка технологий, которые необходимо внедрить.

На следующем этапе происходит проработка вариантов внедрения этих технологий, после чего следуют этапы виртуальных испытаний и выпуск партий опытных образцов. Для автоматизации указанных работ необходима разработка автоматизированной системы управления модернизацией производства с использованием технологий искусственного интеллекта (рис. 10).

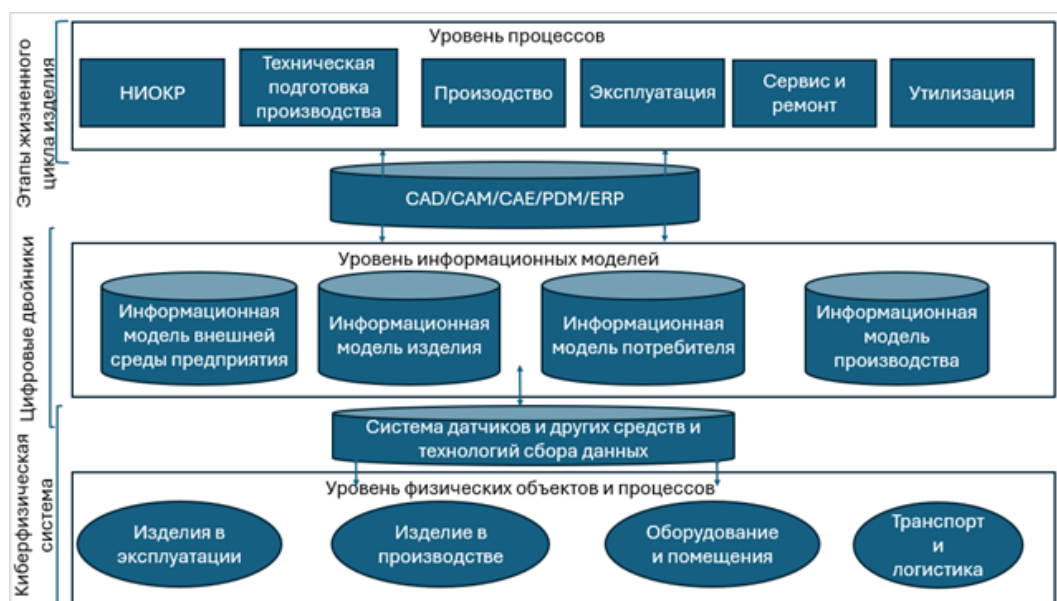


Рисунок 8 – Модель информационно-ориентированного производства



Рисунок 9 – Функциональная модель отделов R&D производства

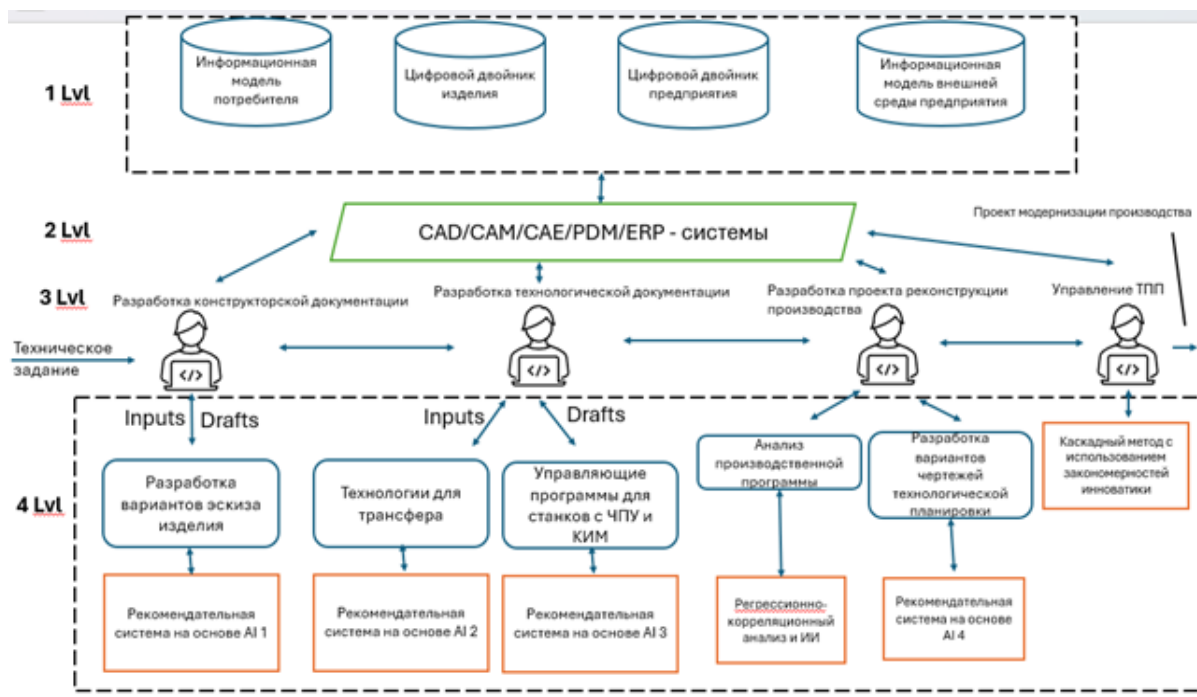


Рисунок 10 – Когнитивная модель человеко-машинного взаимодействия в процессах научной и технической подготовки производства

На рисунке 10 показана многоуровневая модель. На 4 уровне (4 Lvl) системы можно увидеть основные модули, которые образуют архитектуру нейросетевой системы управления модернизацией производства. Конкретная разработка этих модулей описывается в цитируемых работах авторов:

1) разработка вариантов эскиза изделия – этот модуль реализуется на базе системы с использованием нейросетевых архитектур, в том числе *GAN* (*generative adversarial networks*). На вход системы подаются ключевые слова, система предлагает варианты эскиза изделия (чертежи);

2) технологии для трансфера – система поиска технологий для трансфера, которая анализирует основные тренды развития НИОКР отрасли, позволяет оценить степень зрелости технологии, а также с использованием обученной языковой модели рекомендует решения для поставленных технологических задач;

3) управляющие программы для станков с ЧПУ и КИМ – система для автоматизированной разработки управляющей программы предлагает варианты кода программы для обработки и контроля изделий. Она основана на использовании нейросетевой модели, которая на вход принимает операционный эскиз, а на выходе предлагает варианты программы в G-кодах;

4) анализ производственной программы предприятия – модуль, позволяющий находить узкие места в производственных мощностях предприятия и кластеризовать изделия, обеспечивая оптимальную производственную структуру;

5) проектирование вариантов чертежей технологических планировок – разработка эскизных вариантов расположения оборудования производственных

помещений;

6) каскадный метод – метод, позволяющий управлять проектами модернизации производства по системе точно в срок и в пределах сметы [20].

Обсуждение. Настоящая статья поднимает проблематику смены парадигмы организации и проектирования производства и технологий в условиях цифровизации отрасли. Данная статья определяет основные подходы к производству будущего – *data-driven production*, а также концептуальные модели и архитектуры. Конкретную реализацию программных решений и нейросетевых моделей можно найти в сопряжённых публикациях авторов [20].

Выводы. В рамках проведенного исследования:

– установлено, что трудоемкость внедрения новых технологий в умное производство смещается на этап НИОКР в отличие от традиционного производства, где более затратными являются этапы освоения технологий на самом производстве. Эта тенденция наблюдается на фоне снижающейся отдачи от исследований, что обуславливает необходимость ускорения разработки новых технологий, равно как и прототипирования новых изделий путем внедрения информационных моделей с целью автоматизации основных этапов НИОКР;

– разработана функциональная модель информационно-ориентированного производства;

– представлена функциональная модель департаментов *R&D*, отвечающих за устойчивое развитие производства;

– предложена когнитивная модель человеко-машинного взаимодействия в процессах научной и технической подготовки производства с применением технологий искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Боровков А. и др. Руководство по цифровой трансформации производственных предприятий. – М.: Сколково, 2019. – 221 с.
2. Махмудова И.Н. «Умное» предприятие: цифровое производство, импортозамещение // Экономика и предпринимательство. – 2022. – № 5 (142). – С. 779-782 DOI: 10.34925/EIP.2022.142.5.146.
3. Ежов В. Как создать цифровое производство в электронной промышленности // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2019. – №6. – С. 58-60. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.187.6.58.60.
4. Nataliya N. Trofimova Smart manufacturing and related complexities and risks // SCIENTIFIC LIBRARY Publishing House. – 2023. – №2. – С. 779-782. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.02.02.013>.
5. Ковалевский Ю. «Умное» производство гражданской продукции визит на сборочное производство отдела приборостроения АО «НПП «Исток» имени А.И. Шокина» // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2020. – №7. – С. 40-51. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.02.02.013>.
6. Грязнов С.А. Умная промышленность и умное производство // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – №4-2.
7. Умное производство // TAdviser URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Умное_производство (дата обращения: 25.02.2025).
8. Баурина С.Б. Технологии будущего: умные производства в промышленности // Вестник РЭА им. Г.В. Плеханова. – 2020. – №2 (110).
9. Ведмидь П.А. О концепциях цифрового, умного производства и новых технологиях // Автоматизация в промышленности. – 2022. – №12. – С. 55-62.
10. Цифровизация промышленности // TAdviser URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Обзор_Цифровизация_промышленности_2024 (дата обращения: 19.03.2025).
11. Алексеев А.А. Цифровизация производства // Академия. – 2019. – №1 (40).
12. Дривольская Н.А., Моложавенко О.А. Цифровизация промышленности как фактор устойчивого развития производства // Экономика и бизнес: теория и практика. – №9-1. – 2021.
13. Северин А.И., Виноградов Ю.М. Прогресс робототехники в переходе от Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0 // Известия ТулГУ. Технические науки. – №1. – 2024.
14. Бабкин А.В., Шкарупета Е.В., Плотноков В.А. Управление кросс-отраслевым потенциалом развития в условиях Индустрии 5.0: теория, инструментарий и практические приложения // ЭВР. – 2022. – №2 (72).
15. ГОСТ Р «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.» от 01.01.2021 № 57700.37-2021 // Национальный стандарт Российской Федерации. – 2021 г.
16. ГОСТ Р «Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологии. Термины и определения» от 01.01.2016 № 56862-2016 -2016 // Национальный стандарт Российской Федерации. – 2016 г.
17. R&D (рынок России) // TAdviser. URL: [www.tadviser.ru/index.php/Статья:R%26D_\(рынок_России\)?ysclid=m5tgl-37mzh882557670](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:R%26D_(рынок_России)?ysclid=m5tgl-37mzh882557670) (дата обращения: 25.02.2025).
18. Статистика: Macrotrends. – URL: www.macrotrends.net (25.02.2025).
19. Nicholas Bloom Charles I. Jones John Van Reenen Michael Webb Are Ideas Getting Harder to Find? // American Economic Review. April 2020. – №4. – V. 110. – С. 1104-1144.
20. Шайхулова А.Ф. Автоматизация и управление инновационными проектами технического перевооружения авиадвигателестроительного производства на основе каскадного метода оптимизации: дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2018. – С. 218.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.85

EDN: ZXQSNW

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ УСПЕВАЕМОСТИ УЧАЩИХСЯ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ
МЕТОДА К-БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ В ОБЛАСТИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

© 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: 2907-4092

AuthorID: 591719

ORCID: 0000-0002-8618-9822

СИНЕВ Михаил Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: mix.sinev@gmail.com),

SPIN: 8648-1969

AuthorID: 666914

ORCID: 0000-0002-3672-0558

МИТРОХИНА Наталья Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вычислительная техника»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: natenal@yandex.ru),

SPIN: 5596-9633

AuthorID: 1292181

ORCID: 0009-0004-1946-1568

РАСТОРГУЕВА Ксения Владимировна, студент кафедры «Вычислительная техника»

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: kseniarastor@yandex.ru)

Аннотация. В работе освещается одна из главных проблем сферы образования – повышение успеваемости учащихся. Для решения поставленной задачи важно производить отслеживание и прогнозирование успеваемости учащихся в различные учебные периоды. В целях упрощения процесса оценки успеваемости и уменьшения затрачиваемого времени на каждой итерации в статье предлагается алгоритм, определяющий уровень освоения образовательной программы учеником. Представленный вариант классификации основан на обучении нейронной сети методом k -ближайших соседей. Обучение нейронной сети произведено с помощью найденного набора данных, отражающего основные факторы, влияющие на успеваемость учащихся. Для получения корректных результатов проведен анализ и сделана обработка обучающих данных. Подготовка выбранного набора данных и написание программы осуществлены с использованием основополагающих стадий методологии *CRISP-DM*. Рассмотрение главных особенностей методологии подтверждает обоснованность её широкого распространения. После обучения нейронной сети произведена оценка полученных результатов.

Ключевые слова: нейронные сети, метод обучения k -ближайших соседей, *CRISP-DM*, обработка набора данных, информационные технологии в образовании.

**DETERMINING THE LEVEL OF STUDENT ACHIEVEMENT BY APPLYING THE K-NEAREST
NEIGHBORS METHOD IN MACHINE LEARNING**

© The Author(s) 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)

SINEV Mikhail Petrovich, candidate of technical sciences,

associate professor of sub-department «Computer engineering»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: mix.sinev@gmail.com),

MITROKHINA Natalya Yuryevna, candidate of technical sciences,

associate professor of sub-department «Computer engineering»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: natenal@yandex.ru),

RASTORGUEVA Ksenia Vladimirovna, student of sub-department «Computer engineering»

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: kseniarastor@yandex.ru)

Abstract. This article highlights one of the main problems in the field of education - improving student achievement. In order to solve this problem, it is important to track and predict the performance of students in different academic periods. In order to simplify the process of assessment of academic performance and reduce the time spent at each iteration, the paper proposes an algorithm that determines the level of mastering the educational program by a student. The presented variant of classification is based on training a neural network using the k-nearest neighbors method. The training of the neural network is performed using the found dataset reflecting the main factors affecting the student's academic performance. The training data was analyzed and processed to obtain correct results. Preparation of the selected dataset and writing of the program was done using the fundamental stages of CRISP-DM methodology. Consideration of the main features of the methodology confirms the validity of its widespread use. After training the neural network, the results obtained were evaluated.

Keywords: neural networks, k-nearest neighbors learning method, CRISP-DM, dataset processing, information technology in education.

Для цитирования: Мартышкин А.И. Определение уровня успеваемости учащихся посредством применения метода k-ближайших соседей в области машинного обучения / А.И. Мартышкин, М.П. Синев, Н.Ю. Митрохина, К.В. Расторгуева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 43-51. – EDN: ZXQSNW.

Введение. За последнее время стремительный рост популярности ИИ-технологий открывает новые возможности для внедрения нейронных сетей в различные области жизни. В том числе нейронные сети начинают использоваться в сфере образования, где одной из главных проблем является определение уровня успеваемости учащегося и выявление его зависимости от различных факторов. Другие проблемы, решаемые с помощью нейросетей в образовательной среде, а также перспективы и возможности использования нейронных сетей представляются в работе [1]. В работе [2] рассмотрен метод ручной обработки данных для анализа успеваемости учащихся, который показывает необходимость автоматизации процесса. В [3] проведено исследование по определению возможности осуществления прогнозирования успеваемости учащегося и выявлены основополагающие признаки, влияющие на показатели успеваемости. Для достижения указанных задач в работе применяются такие алгоритмы машинного обучения как «дерево решений» и «случайный лес». В ходе работы [4] один из наиболее высоких показателей точности предсказания успеваемости учащегося содержит метод k-ближайших соседей, вследствие чего было принято решение о применении данного метода для обучения нейронной сети.

Актуальность проводимого исследования вызвана высоким спросом конкурентоспособных специалистов на рынке труда. Решение задач, связанных с улучшением показателей успеваемости учащихся, внесет вклад в развитие образовательной среды, что повлечет увеличение количества высококвалифицированных специалистов. Алгоритм, построенный на основе обученной нейронной сети, сможет эффективно обрабатывать информацию, принимая во внимание факторы, подаваемые в качестве входных параметров. Возможность с помощью программы обрабатывать большие объемы данных позволит снизить человеческие и временные ресурсы, а также

повысить точность результата благодаря автоматизации процесса.

Целью статьи является обучение нейронной сети для оценки успеваемости учащихся по некоторому множеству признаков, относящихся к описанию качества жизни. Рассмотрена методология анализа данных CRISP-DM. Представлен анализ выборки данных для корректного обучения нейронной сети согласно методологии CRISP-DM. Уделено внимание обоснованию выбора метода обучения k-ближайших соседей нейронной сети. Выявлены особенности метода обучения k-ближайших соседей.

Методология. Использование методологии CRISP-DM подтверждено во многих сферах, однако наиболее распространенными являются области здравоохранения и образования [5]. Одной из причин широкого распространения методологии CRISP-DM является ее гибкость. Переход от различных этапов не представляет собой строго зафиксированную последовательность и зависит от конкретного проекта. Возможность вернуться на необходимую стадию методологии позволяет наилучшим образом провести анализ исследуемых данных.

Циклический характер методологии позволяет получать опыт на каждой итерации и использовать его в дальнейшем для корректировки результатов. Жизненный цикл CRISP-DM состоит из следующих стадий:

- Бизнес-анализ (*Business understanding*);
- Анализ данных (*Data understanding*);
- Подготовка данных (*Data preparation*);
- Моделирование (*Modeling*);
- Оценка (*Evaluation*);
- Внедрение (*Deployment*) [6-8].

Метод k-ближайших соседей является одним из классических или традиционных методов машинного обучения для классификации [9]. Метод k-ближайших соседей – это методика обучения с учителем, используемая для классификации новых точек данных на ос-

новые отношения к близлежащим точкам данных [10]. Число соседей определяется гиперпараметром k , что дает возможность отследить наилучшую точность обучения модели при разном числе соседей. После выбора нескольких ближайших соседей производится определение наиболее выраженного класса из представленной выборки. Каждая задача требует индивидуального подбора параметра k [11, 12]. В работе метод k -ближайших соседей применяется для мультиклассовой классификации.

В качестве программных сред и библиотек для осуществления мероприятий по подготовке данных и реализации алгоритма машинного обучения выбраны *Pandas*, *Numpy*, *Matplotlib*, *Sklearn*, *Scikit-learn*, *Scipy*, *Statistics*, *Seaborn* языка программирования *Python*

[13-19].

С использованием метода k -ближайших соседей написана программа для определения уровня успеваемости учащегося. Через пользовательский интерфейс на вход программа принимает данные, влияющие на уровень успеваемости ученика. Выводом является предполагаемая степень освоения образовательной программы учащимся. Результат программы основан на обученной модели нейронной сети.

Обобщенная схема программы представлена на рисунке 1.

Блок-схема алгоритма обучения модели нейронной сети, с помощью которой осуществляется обработка введенных Пользователем данных, представлена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Схема программы



Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма обучения модели нейронной сети

Действие «Выделение признаков» предполагает формирование списка параметров, по которым будет производиться оценка степени успешного обучения учащегося. Следующий шаг «Определение шкалы пересчета баллов» необходим для установления соответствия между итоговым баллом и уровнем успеваемости ученика. Для корректного обучения выполняется стандартизация данных:

```

scaler = StandardScaler()
X_train = scaler.fit_transform(X_train)
X_test = scaler.transform(X_test)
  
```

Затем производится обучение модели на трени-

ровочных данных методом k -ближайших соседей, при этом осуществляется поиск оптимального числа соседей:

```

knn = KNeighborsClassifier()
from sklearn.model_selection import GridSearchCV
k_range = list(range(1, 50))
param_grid = dict(n_neighbors=k_range)
grid = GridSearchCV(knn, param_grid, cv=10, scoring='accuracy', return_train_score=False, verbose=1)
grid_search=grid.fit(X_train, y_train)
  
```

Определение точности классификации необходимо для дальнейшего логирования и сбора стати-

стики.

Для последующего использования обученной нейронной сети полученный результат сохраняется:

```
joblib.dump(grid_search.best_estimator_, 'knn_best_model.pkl')
```

Результаты. Для реализации поставленных целей был подобран открытый структурированный датасет [20] на публичной веб-платформе «Kaggle» [21]. Выбранный датасет разработан специально для имитации реальных сценариев с учётом основных факторов, влияющих на успеваемость. Набор данных представляет собой искусственно сформированный список характеристик учащихся, состоящий из следующих параметров:

- *Socioeconomic Score* (значение в диапазоне от 0 до 1);
- *Study Hours* (значение в диапазоне от 0,8 до 10);
- *Sleep Hours* (значение в диапазоне от 4,8 до 10);
- *Attendance* (значение в диапазоне от 40 до 100);
- *Grades* (значение в диапазоне от 32 до 91).

Выборка представлена 1387 строками и 5 столбцами. Признаковое пространство составля-

ют 5 числовых характеристик. *Socioeconomic Score* представляет собой значение, описывающее социально-экономическое положение учащегося. *Study Hours* – среднее количество часов, отведенных на учебу в день. *Sleep Hours* – среднее количество часов, отведенных на сон в день. *Attendance* описывает процент посещённых занятий учащимся. *Grades* – итоговый балл успеваемости учащегося. Параметр *Grades* является целевой переменной.

Изначальный баланс выборки представлен на рисунке 3.

Графическое представление распределения числовых характеристик каждого признака представлено на рисунке 4.

Введем следующую шкалу для оценки успеваемости учащегося:

- 32-34 балла – низкая успеваемость;
- 35-45 балла – средняя успеваемость;
- 46-91 балла – высокая успеваемость.

В зависимости от значения целевой переменной *Grades*, содержащей итоговый балл, успеваемость учащегося классифицируется как низкая, средняя или высокая.



Рисунок 3 – Диаграмма баланса выборки данных

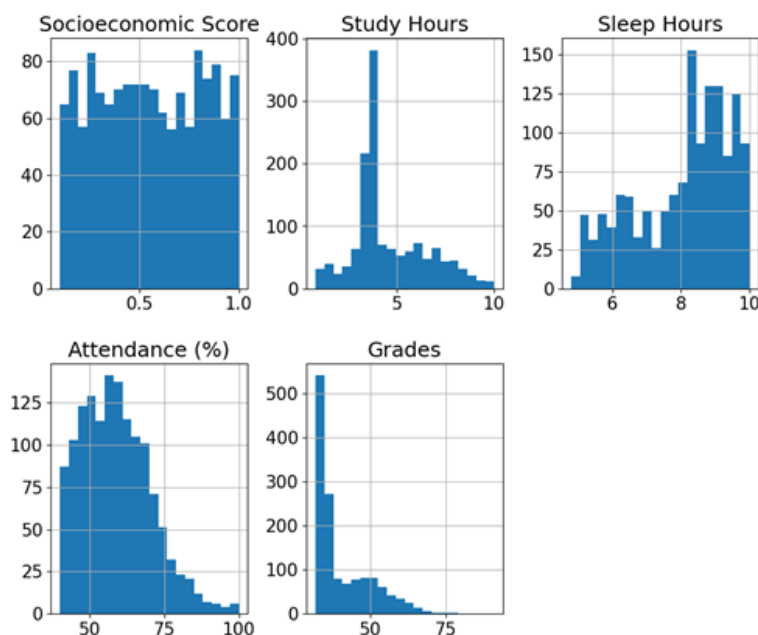


Рисунок 4 – Гистограммы признакового пространства

Сводка описательных статистик по количественным переменным демонстрирует небольшой разброс между средним арифметическим и медианой, что доказывает отсутствие сильных выбросов, либо их симметричное расположение. Сводка описательных статистик приведена на рисунке 5.

Также для каждого признака построена диаграмма размаха, представленная на рисунке 6. Исходя из

оценки диаграммы размаха, было принято решение об удалении некоторых экземпляров в выборке. А именно удалены объекты, содержащие значения *Study Hours* больше, чем 9,3 и *Attendance* больше, чем 91.

Оптимальный баланс выборки после удаления выбросов сохранился.

Итоговый баланс выборки данных представлен на рисунке 7.

	Socioeconomic Score	Study Hours	Sleep Hours	Attendance (%)	Grades
count	1388.000000	1388.000000	1388.000000	1388.000000	1388.000000
mean	0.552274	4.560807	8.047262	58.536023	40.691643
std	0.261272	1.897581	1.370700	11.675287	9.467358
min	0.101280	0.800000	4.800000	40.000000	32.000000
25%	0.322118	3.475000	7.000000	49.000000	34.000000
50%	0.545945	3.900000	8.400000	57.000000	35.000000
75%	0.789610	5.900000	9.100000	66.000000	47.000000
max	0.999820	10.000000	10.000000	100.000000	91.000000

а)

	Socioeconomic Score	Study Hours	Sleep Hours	Attendance (%)	Grades
count	540.000000	540.000000	540.000000	540.000000	540.000000
mean	0.469905	3.309630	8.083704	55.594444	33.601852
std	0.217464	0.860976	1.390544	10.388929	0.573694
min	0.101550	0.800000	5.000000	40.000000	32.000000
25%	0.283445	3.100000	6.900000	47.000000	33.000000
50%	0.452275	3.600000	8.400000	54.000000	34.000000
75%	0.637350	3.800000	9.200000	63.000000	34.000000
max	0.934870	4.800000	10.000000	87.000000	34.000000

б)

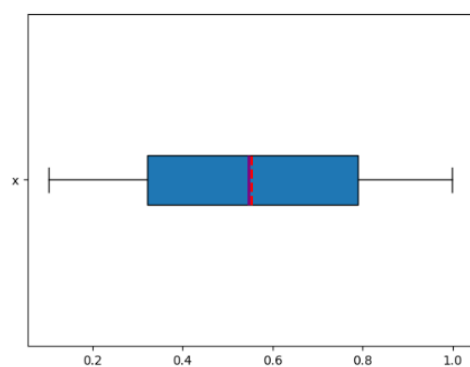
	Socioeconomic Score	Study Hours	Sleep Hours	Attendance (%)	Grades
count	467.000000	467.000000	467.000000	467.000000	467.000000
mean	0.555590	4.187794	8.177302	57.884368	37.899358
std	0.257788	1.256042	1.322664	10.135113	3.332848
min	0.101280	0.900000	4.800000	40.000000	35.000000
25%	0.326130	3.400000	7.400000	51.000000	35.000000
50%	0.554120	3.900000	8.500000	57.000000	36.000000
75%	0.806930	5.250000	9.200000	65.000000	40.500000
max	0.986530	6.800000	10.000000	88.000000	45.000000

в)

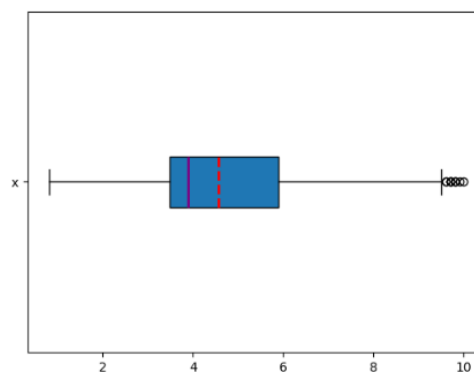
	Socioeconomic Score	Study Hours	Sleep Hours	Attendance (%)	Grades
count	381.000000	381.000000	381.000000	381.000000	381.000000
mean	0.664953	6.791339	7.836220	63.503937	54.162730
std	0.279649	1.665202	1.379245	13.450616	7.078491
min	0.103850	2.900000	5.000000	40.000000	46.000000
25%	0.441180	6.100000	6.600000	54.000000	49.000000
50%	0.740710	7.000000	8.200000	61.000000	52.000000
75%	0.925570	7.900000	8.900000	71.000000	58.000000
max	0.999820	10.000000	10.000000	100.000000	91.000000

г)

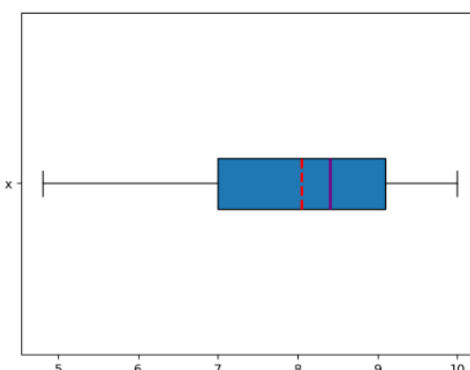
Рисунок 5 – Сводка описательных статистик по количественным переменным по всей выборке данных (а), по части выборки, отведенной для класса «низкая успеваемость» (б), по части выборки, отведенной для класса «средняя успеваемость» (в), по части выборки, отведенной для класса «высокая успеваемость» (г)



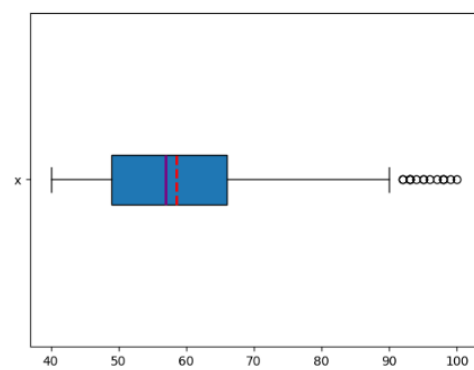
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Диаграмма размаха для параметров Socioeconomic Score(а), Study Hours(б), Sleep Hours(в), Attendance(г)

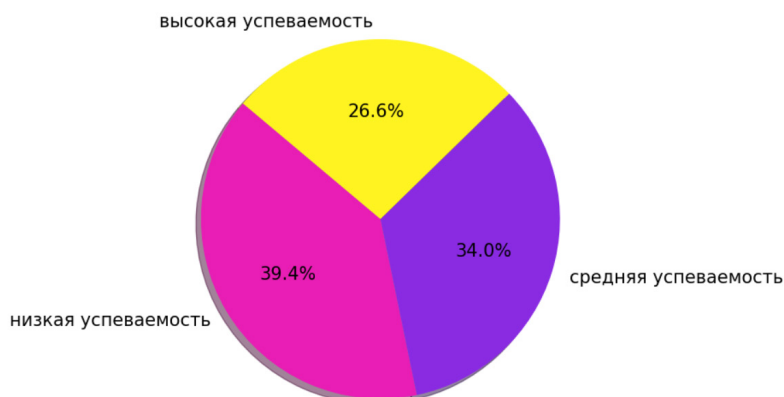


Рисунок 7 – Диаграмма баланса выборки данных после удаления выбросов

Неуникальные строки в датасете не найдены, следовательно, дубликаты в наборе данных отсутствуют.

Для написания пользовательского интерфейса использовалась библиотека *Streamlit* языка программирования *Python* [22]. Пользователю предлагается на выбор несколько вариантов запроса:

- показать зависимость между социально-экономической средой и успеваемостью;
- показать зависимость между количеством сна и успеваемостью;
- показать зависимость между количеством обучения и успеваемостью;
- показать зависимость между посещаемостью и успеваемостью;
- произвести оценку успеваемости по заданным параметрам.

В ходе взаимодействия пользователя с интерфейсом сохраняется история запросов пользователя.

Главный экран, с которого пользователь начинает взаимодействие с системой, представлен на рисунке 8.

Таким образом, пользователь обладает возможностью просмотра в графическом виде зависимостей успеваемости учащегося от таких параметров как социально-экономическая среда, количество часов сна, количество часов учебы, посещаемость. Результат представления зависимостей успеваемости от различных факторов представлен на рисунке 9.

Также пользователю предлагается самостоятельно ввести данные по нескольким параметрам (социально-экономическая среда, количество часов сна, количество часов учебы, посещаемость), на основе которых будет определен уровень успеваемости учащегося: низкий, средний или высокий.

Результат оценки уровня успеваемости учащегося по самостоятельно заданным параметрам приведен на рисунке 10.

Оценка успеваемости учащегося

М

Чем Вам помочь?

Показать зависимость между социально-экономической средой и успеваемостью

Показать зависимость между количеством сна и успеваемостью

Показать зависимость между количеством обучения и успеваемостью

Показать зависимость между посещаемостью и успеваемостью

Произвести оценку успеваемости по заданным параметрам

Укажите уровень социально-экономической среды учащегося

0

100

Укажите количество часов сна

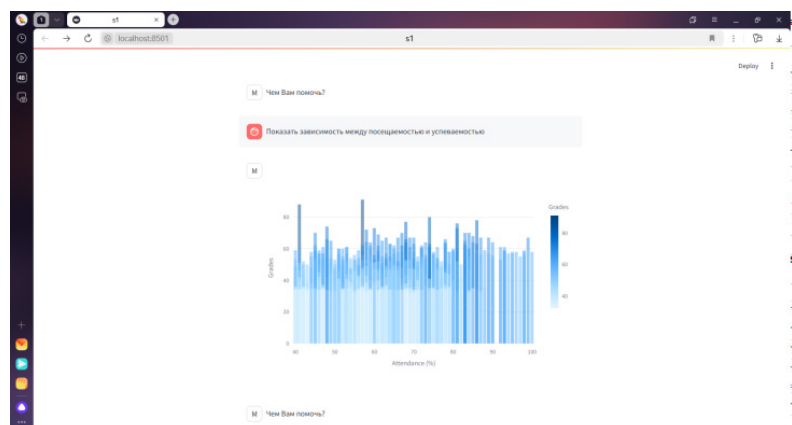
0

10

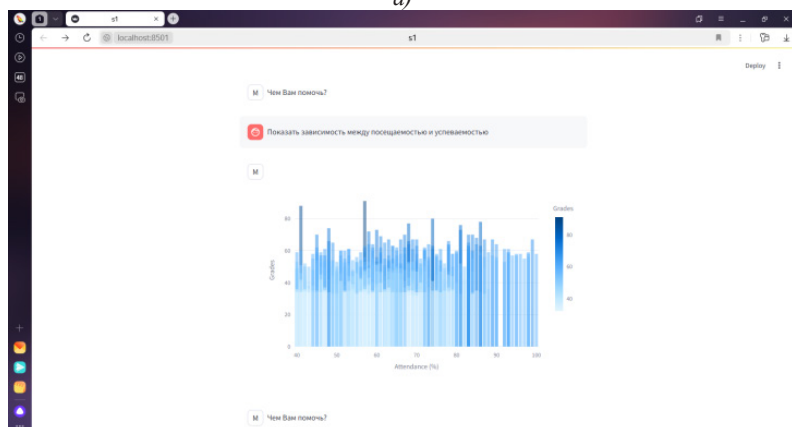
Укажите количество часов обучения

0

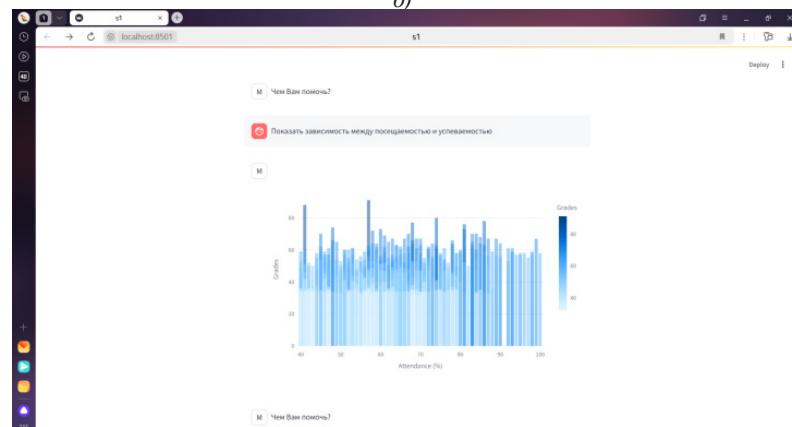
Рисунок 8 – Начальный экран системы



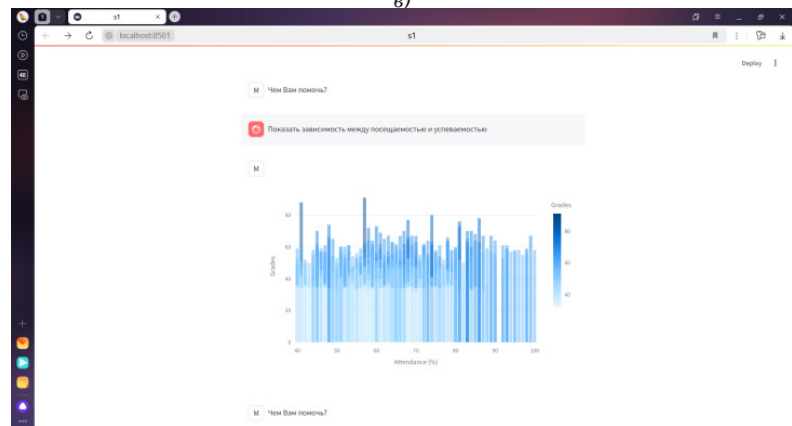
a)



б)



в)



г)

Рисунок 9 – Гистограмма зависимости успеваемости а) от социально-экономической среды, б) от количества часов сна, в) от количества часов обучения, г) от посещаемости

М Чем Вам помочь?

Произвести оценку успеваемости по заданным параметрам

М Количество часов сна: 4, Часы обучения: 5, Посещаемость: 61%, Уровень социально-экономического окружения: 0.57

Средний уровень успеваемости

М Чем Вам помочь?

Показать зависимость между социально-экономической средой и успеваемостью

Показать зависимость между количеством сна и успеваемостью

Показать зависимость между количеством обучения и успеваемостью

Показать зависимость между посещаемостью и успеваемостью

Произвести оценку успеваемости по заданным параметрам

Укажите уровень социально-экономической среды учащегося

0 1.00

Рисунок 10 – Оценка уровня успеваемости по заданным параметрам

Обсуждение. Для обучения модели набор данных был разделен на тестовую и обучающую выборку процентным соотношением 20% на 80%. После обучения модели на тестовой выборке построена матрица ошибок, показанная на рисунке 11.

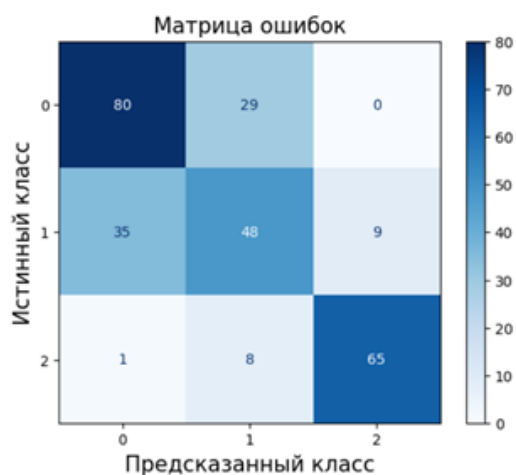


Рисунок 11 – Матрица ошибок

В ходе обучения наилучшие результаты были достигнуты при количестве соседей, равном 19. Для обучения классам были присвоены следующие метки: «-1» – «низкая успеваемость», «0» – «средняя успеваемость», «1» – «высокая успеваемость». Высокие показатели точности наблюдаются для классов «низкая успеваемость» и «высокая успеваемость». Низкие значения полноты и точности показывает класс «средняя успеваемость», что свидетельствует о неточных предсказаниях данного класса. Подводя итог, можно заметить, что общим результатом

обучения является точность классификации, составляющая 75%. Основные метрики качества классификации – *accuracy* (правильность), *recall* (полнота), *precision* (точность) [23] – представлены на рисунке 12.

Fitting 10 folds for each of 49 candidates, totalling 490 fits
Лучшие параметры: {'n_neighbors': 19}

	precision	recall	f1-score	support
-1.0	0.70	0.92	0.80	109
0.0	0.67	0.48	0.56	92
1.0	0.91	0.82	0.87	74
accuracy			0.75	275
macro avg	0.76	0.74	0.74	275
weighted avg	0.75	0.75	0.73	275

Рисунок 12 – Результаты обучения

Выводы. Таким образом, в статье было описано обучение нейронной сети методом *k*-ближайших соседей. Полученные результаты классификации апробированы на пользовательском приложении, реализующем функционал определения успеваемости учащихся. Перспективы дальнейших исследований заключаются в достижении наиболее точной классифицирующей модели. Кроме того, следует рассмотреть вариант прогнозирования успеваемости учащихся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Туманова И.В. Влияние, перспективы и возможности использования нейронных сетей в современной образовательной среде // Инновационные процессы в современном образовании: от идеи до практики: материалы IV Международной научно-практической конференции с использованием дистанционных технологий. Ярославль, 2024. – С. 32-35.
2. Аршинский В.Л., Провоторов В.А. Применение искусственных нейронных сетей и машинного обучения

для прогнозирования успеваемости студентов высших учебных заведений // Вестник МГПУ. Серия «Информатика и информатизация образования». – 2024. – № 4 (70). – С. 61-72.

3. Побединская, Т.В., Заславская, О.Ю. Использование алгоритмов машинного обучения для прогноза успеваемости учащихся основной школы // Вестник МГПУ. Серия «Информатика и информатизация образования». – 2022. – № 4(62). – С. 75-82. – DOI: 10.25688/2072-9014.2022.62.4.06.

4. Попова Н.А., Егорова Е.С. Интеллектуальный анализ образовательных данных для прогноза успеваемости студентов вуза // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2023. – № 2(112). – С. 18-29. – DOI: 10.35330/1991-6639-2023-2-112-18-29.

5. Christoph Schröer, Felix Kruse, Jorge Marx Gómez. A systematic literature review on applying CRISP-DM process model // Procedia Computer Science. – 2021. – Т. 181. – С. 526-534.

6. Pete Chapman, Julian Clinton, Randy Kerber, Thomas Khabaza, Thomas Reinartz, Colin Shearer, Rüdiger Wirth. CRISP-DM 1.0. Step-by-step data mining guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://tma42.com/crisp-dm.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).

7. Савилова Е.А. Обзор методологий управления проектами в области искусственного интеллекта // Вестник науки и образования. – 2021. – № 6-1 (109). – С. 29-33.

8. Patrick Stanula, Amina Ziegenbein, Joachim Metternich. Machine learning algorithms in production: A guideline for efficient data source selection // 6th CIRP Global Web Conference “Envisaging the future manufacturing, design, technologies and systems in innovation era”. – 2018. – С. 261-266.

9. Боженко В.В., Клюканов В.К. Разработка классификаторов на основе полносвязных нейронных сетей и алгоритмов классического машинного обучения // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах’23: сборник докладов Третьей Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2023. – С. 10-13.

10. Сунчалин А.М. Основные элементы машинного обучения // Фундаментальные исследования. – 2021. – № 5. – С. 93-97.

11. Киселева Т.В., Маслова Е.В., Бычков А.Г. Машинное обучение для решения задач распознавания образов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2021. – № 2 (18). – С. 19-24.

12. Halder R.K., Uddin M.N., Uddin M.A. et al. Enhancing K-nearest neighbor algorithm: a comprehensive review and performance analysis of modifications. Journal of Big Data 11. – 113. – 2024. [Электронный ресурс]. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40537-024-00973-y> (дата обращения: 15.03.2025).

13. Pandas – Python Data Analysis Library. Official website [Электронный ресурс]. – URL: <https://pandas.pydata.org/> (дата обращения: 15.03.2025).

14. NumPy in Python [Электронный ресурс]. – URL: <https://numpy.org/> (дата обращения: 15.03.2025).

15. Matplotlib – Visualization with Python. Matplotlib 3.10.1 documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://matplotlib.org/> (дата обращения: 15.03.2025).

16. Scikit-learn: machine learning in Python – scikit-learn 1.6.1 documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (дата обращения: 15.03.2025).

17. SciPy in Python [Электронный ресурс]. – URL: <https://scipy.org/> (дата обращения: 15.03.2025).

18. Python statistics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.book2s.com/tutorials/python-statistics.html> (дата обращения: 15.03.2025).

19. Seaborn: statistical data visualization – seaborn 0.13.2 documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://seaborn.pydata.org/> (дата обращения: 15.03.2025).

20. Беликов М.К. Основные способы машинного обучения // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаем будущее: сборник статей XLIII Международной научно-практической конференции. 2023. – С. 19-21.

21. Конкурсная платформа по исследованию данных Kaggle Machine Learning Competition Platform (Google). 2020. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kaggle.com/> (дата обращения: 15.03.2025).

22. Streamlit documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.streamlit.io/> (дата обращения: 15.03.2025).

23. Боженко В.В., Клюканов В.К. Применение алгорит-

мов машинного обучения в задачах классификации и кластеризации // Обработка, передачи и защита информации в компьютерных системах’22: сборник докладов Второй Международной научной конференции. Санкт-Петербург, 2022. – С. 28-33.

Статья поступила в редакцию 04.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

У

ДК: 004.932

EDN: VSDGHG

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ДЕСКРИПТОРОВ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЙ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7500-4792

AuthorID: 1283786

ORCID: 0009-0006-6765-5054

ДЕНИСОВ Александр Анатольевич, аспирант

*Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
(390005, город Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: denal777@gmail.com)*

SPIN: 9185-2722

AuthorID: 681633

ORCID: 0000-0002-8166-8234

НОВИКОВ Анатолий Иванович, доктор технических наук,

профессор кафедры «Высшая математика»

*Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
(390005, город Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru)*

Аннотация. Проблема поиска ключевых точек на изображении является одной из наиболее «старых» в цифровой обработке изображений. Существует множество методов детектирования ключевых точек и формирования дескрипторов, однако задача построения более быстрых алгоритмов для использования в системах технического зрения реального времени остается актуальной. Задачей настоящей работы является обоснование двух новых методов построения дескрипторов. В первом методе реализуется аппроксимация плоскостями четырех треугольных секторов в окрестности ключевой точки. Векторы нормалей плоскостей выступают в качестве дескрипторов ключевой точки. Второй метод основан на вычислении показателей кривизны в четырех направлениях с помощью линейных операторов с векторными масками. Они обеспечивают получение оптимальных оценок производной второго порядка, характеризующей направление выпуклости, аппроксимирующей кривой и дающей опосредованную оценку кривизны. Приводятся примеры формирования дескрипторов и их использования для сопоставления ключевых точек, обнаруженных на двух совмещаемых изображениях. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что точность предложенных методов не уступает многим известным методам или превосходит их, а время выполнения полного цикла обнаружения ключевых точек, их описания и сопоставления соответствует требованиям систем технического зрения реального времени.

Ключевые слова: ключевая точка, детектор, дескриптор ключевой точки, вектор нормали, метод кривизн, направление выпуклости, сравнение дескрипторов, точность сопоставления.

METHODS FOR CONSTRUCTING IMAGE KEY POINTS DESCRIPTORS

© The Author(s) 2025

DENISOV Aleksandr Anatolievich, post-graduate student

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(59/1 Gagarin Street, Ryazan, 390005, e-mail: denal777@gmail.com)*

NOVIKOV Anatoly Ivanovich, doctor of technical sciences,

professor of the Department of Higher Mathematics

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(59/1 Gagarin Street, Ryazan, 390005, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru)*

Abstract. The problem of finding key points in an image is one of the oldest in digital image processing. There are many methods for detecting key points and forming descriptors, but the task of building faster algorithms for use in real-time machine vision systems remains relevant. The objective of this paper is to substantiate two new methods of constructing descriptors. The first method implements the approximation of four triangular sectors in the vicinity of a key point by planes. The normal vectors of the planes act as key point descriptors. The second method is based on calculating curvature indices in four directions using linear operators with vector masks. They provide optimal estimates of the second-order derivative characterizing the direction of convexity of the approximating curve and giving an indirect estimate of the curvature. Examples of descriptor formation and their use for matching key points detected on two images being combined are given. The results of the experiments indicate that the accuracy of the proposed methods is not inferior to many known methods or exceeds them, and the execution time of the full cycle of detecting key points, their description and comparison meets the requirements of real-time technical vision systems.

Keywords: key point, detector, key point descriptor, normal vector, curvature, convexity direction, descriptor comparison.

Для цитирования: Денисов А.А. Методы построения дескрипторов ключевых точек изображений / А.А. Денисов, А.И. Новиков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 52-60. – EDN: VSDGHG.

Введение. Подходы, основанные на регистрации ключевых точек, зарекомендовали себя как надёжный инструмент в задачах компьютерного зрения, таких как отслеживание объектов, сопоставление изображений и восстановление 3D-структуры сцены. Алгоритмические методы, несмотря на развитие нейросетевых технологий, остаются востребованными благодаря своей интерпретируемости и низким вычислительным затратам. Более того, в ряде прикладных задач, особенно при необходимости вычислений в реальном времени, они демонстрируют не только конкурентоспособные, но и превосходящие результаты по сравнению с современными глубокими нейросетевыми подходами [1]. Целью настоящего исследования является обоснование новых методов описания ключевых точек изображения.

Известно множество определений ключевых точек на изображении как «точек на изображении, характеризующих их локальные особенности и выделяемые для последующего сопоставления» [2], «точек (пикселей), отображающие уникальность, особенность изображения, по которым можно классифицировать изображение, распознать его» [3], «точек, обнаружение которых на снимках инвариантно к сдвигу и повороту камеры». При этом все авторы считают, что основные свойства ключевых точек – это:

- воспроизводимость (*Repeatability*) – на разных изображениях ключевая точка всегда должна находиться на одном и том же месте;
- надёжность (*Reliability*) – точка не должна изменяться при небольших трансформациях изображения [4].

В методах *FAST/FREAK* [5, 6], *SIFT* [7], *SURF* [8], *KAZE* [9], *BRISK* [10] и *ORB* [11] реализованы процедуры описания найденных на этапе детектирования ключевых точек путем создания

векторов дескрипторов, обеспечивающих в целом высокий процент правильных сопоставлений на паре изображений перед этапом их совмещения. Алгоритмы построения дескрипторов в этих методах, за исключением метода *FAST/FREAK* имеют высокую вычислительную сложность.

Метод *FAST/FREAK* является объединением двух методов, один из которых (*FAST*) обеспечивает детектирование ключевых точек, а другой (*FREAK*) – описание ключевой точки. При этом для построения дескриптора ключевой точки используется специфика зрительной системы человека – плотность точек более высокая вблизи центра. Чтобы соответствовать модели сетчатки, алгоритм использует экспоненциально изменяющиеся размеры окрестностей для каждой точки выборки. В методах *SIFT* и *SURF* описание ключевых точек производится с использованием векторных полей градиентов в окрестности ключевых точек. В методе *KAZE* дескрипторы формируются с помощью наборов оценок производных первого и второго порядков в прямоугольной окрестности ключевой точки, которая в свою очередь, разбивается на 16 подобластей. Метод *ORB* представляет собой комбинацию детектора *FAST* и улучшенного дескриптора *BRIEF*, который имеет более высокую эффективность за счет бинарного описания и может использоваться для обработки в реальном времени [12]. Более подробный анализ перечисленных методов приведен в работах [13-15].

Частный случай ключевых точек – это точки, в которых достигается локальный максимум или минимум функции яркостей. На рисунке 1 приведен пример трехмерного изображения функции яркостей в окрестности ключевой точки одного из реальных изображений.

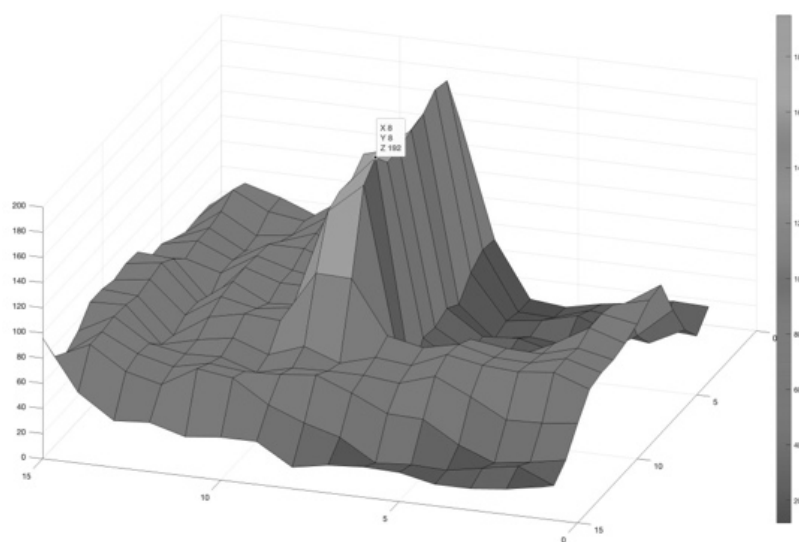


Рисунок 1 – Визуализация изменения интенсивности в области ключевой точки

Для описания таких точек можно предложить более простые алгоритмы формирования дескрипторов. В трехмерном пространстве, с координатами (x, y, I) , где (x, y) – координаты пикселей, I – значения $I = I(x, y)$ функции яркостей, поверхность, образованную этими значениями, можно аппроксимировать алгебраической функцией второго порядка. В каждой точке этой поверхности (в каждом пикселе) можно вычислить вектор нормали. В результате получится множество векторов нормалей, характеризующих ключевую точку. Это множество векторов можно принять за дескриптор ключевой точки. Назовем соответствующий метод методом нормалей. Альтернативный подход можно построить на характеристиках кривизны обозначенной поверхности в окрестности ключевой точки в сечениях плоскостями, перпендикулярными плоскости Oxy . Если кривизны считать непосредственно в ключевой точке, с помощью свертки с симметричной векторной маской, то соответствующие оценки можно получить в направлениях $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ (с шагом 45°). Если же кривизны находить с помощью таких же масок по радиальным направлениям, начиная от ключевой точки, то при том же шаге получим 8 оценок кривизны. Они будут образовывать вектор признаков ключевой точки. Назовем этот метод формирования описаний ключевых точек методом кривизн. Рассмотрим оба метода подробнее.

Методология. В рамках настоящего исследования предложены, разработаны и экспериментально апробированы два новых подхода к построению дескрипторов ключевых точек изображения. Первый метод основан на аппроксимации локальной области

вокруг ключевой точки плоскостями, выделенными в пределах четырех или восьми треугольных секторов. Векторы нормалей к этим плоскостям формируют дескриптор ключевой точки. Второй метод основан на вычислении показателей кривизны в четырех направлениях, что позволяет использовать значения второй производной в качестве признаков при формировании дескриптора.

1. Метод векторов нормалей. Основные положения предлагаемого метода были изложены в работе [12]. Аппроксимация поверхности в окрестности ключевой точки алгебраической функцией второго порядка

$$I(x, y) \cong a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} \quad (1)$$

потребует применения метода наименьших квадратов (МНК) для определения шести параметров функции (1) в каждой ключевой точке. Это достаточно затратная в вычислительном отношении задача. Поэтому в [16] было предложено вместо аппроксимации поверхности в окрестности ключевой точки функцией (1) использовать более простой подход, в соответствии с которым при сопоставлении или объединении изображений, подверженных только смещению и (или) масштабированию, предлагается разбивать окрестность ключевой точки размером 7×7 или 9×9 на 4 сектора (левый фрагмент на рисунке 2). При наличии вращения изображений целесообразно добавление еще 4-х треугольников, взятых с перекрытием под 45° к базовым треугольникам (правый фрагмент на рисунке 2).

Уравнения плоскостей, аппроксимирующих эти треугольники, будет иметь следующий вид

$$I = I_0 + ax + by \quad (2)$$

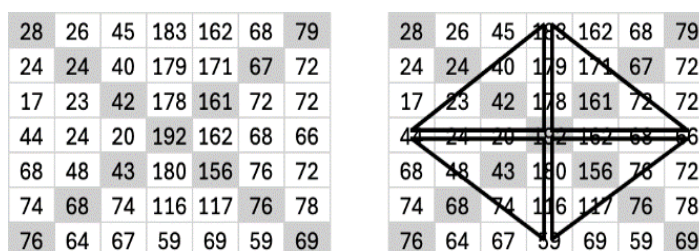


Рисунок 2 – Область ключевой точки, разбитая на секторы
(4 сектора слева и 8 секторов с перекрытием справа)

Переменные x, y в (2) изменяются в пределах выделенного треугольника. Например, для верхнего треугольника на левом фрагменте рисунка 2 в предположении, что окрестность ключевой точки имеет размер $(2k+1) \times (2k+1)$, переменная y изменяется от 0 до k , а x – от $-y$ до $+y$. Оптимальные значения оценок коэффициентов a и b в (2) находятся методом наименьших квадратов из системы уравнений

$$\begin{pmatrix} \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y x^2 & \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y xy \\ \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y xy & \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y x(I(x, y) - I_0) \\ \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y y(I(x, y) - I_0) \end{pmatrix} \quad (3)$$

При фиксированном значении переменной y сумма $\sum_{x=-y}^y xy$ обращается в ноль, поэтому система

линейных алгебраических уравнений (3) будет в итоге иметь следующий вид

$$\begin{pmatrix} \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y x^2 & 0 \\ 0 & \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y x(z_{xy} - z_0) \\ \sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y y(z_{xy} - z_0) \end{pmatrix},$$

а ее решение принимает форму

$$\hat{a} = \frac{\sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y x(z_{xy} - z_0)}{\sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y x^2}, \quad \hat{b} = \frac{\sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y y(z_{xy} - z_0)}{\sum_{y=0}^k \sum_{x=-y}^y y^2} \quad (4)$$

Оценки $\hat{a}, \hat{b}$ коэффициентов уравнения (2) вместе с числом -1 образуют вектор нормали $\vec{n} = (\hat{a}; \hat{b}; -1)$ к соответствующему треугольнику (в данном случае

– к верхнему). Для последующего сравнения векторов нормалей в описании ключевых точек двух сопоставляемых изображений целесообразно эти векторы нормировать:

$$\left(\bar{n}^0 = \frac{\bar{n}}{|\bar{n}|}\right).$$

Подробное изложение практической реализации изложенного алгоритма можно найти в работе [16].

2. Метод кривизн. В сечениях поверхности, образованной значениями функции яркости в окрестности экстремальной точки, плоскостями, перпендикулярными плоскости Oxy , будут получаться кривые. Каждая из этих кривых будет обращена выпуклостью вверх, если экстремальная точка – это точка максимума, и соответственно вниз – для точки минимума. Выпуклость функции одной переменной определяется знаком ее производной второго порядка, а модуль оценки этой производной характеризует косвенно радиус кривизны в соответствующем сечении

Пусть $P: y = bx$ – уравнение секущей плоскости, а (1) – уравнение поверхности, аппроксимирующей функцию яркости в окрестности ключевой точки (x_0, y_0) . Подставив bx вместо переменной y в уравнение (1), получим уравнение параболической кривой

$$L: z = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)^2, \\ x \in \{x_0 - k, x_0 - k + 1, \dots, x_0 - 1, x_0, x_0 + 1, \dots, x_0 + k\}. \quad (5)$$

Оптимальные оценки $\hat{A} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2)^T$ вектора параметров $A = (a_0, a_1, a_2)$ в составе (5) можно найти методом наименьших квадратов, которые, как известно, могут быть записаны в матричной форме в следующем виде [17, 18]:

$$\hat{A} = (T^T T)^{-1} T^T Z. \quad (6)$$

В составе формулы (6)

$$Z = (I(x_0 - k, y_0), \dots, I(x_0 - 1, y_0), I(x_0, y_0), I(x_0 + 1, y_0), \dots, I(x_0 + k, y_0))^T,$$

$$T^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ -k & -k+1 & \dots & -1 & 0 & 1 & \dots & k-1 & k \\ k^2 & (k-1)^2 & \dots & 1 & 0 & 1 & \dots & (k-1)^2 & k^2 \end{pmatrix},$$

$$(T^T T)^{-1} = \gamma_k \begin{pmatrix} 3k^2 + 3k - 1 & 0 & -5 \\ 0 & \frac{(2k-1)(2k+3)}{k(k+1)} & 0 \\ -5 & 0 & \frac{15}{k(k+1)} \end{pmatrix},$$

$$\text{где } \gamma_k = \frac{3}{(4k^2 - 1)(2k + 3)}.$$

Формулу (6) можно переписать в векторно-матричной форме:

$$\hat{A} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2) = ((q_0 \bullet Z), (q_1 \bullet Z), (q_2 \bullet Z))^T \quad (7)$$

Здесь $(2k+1)$ – мерные векторы q_0, q_1, q_2 являются элементами соответственно первой, второй и третьей строк матрицы $Q = (T^T T)^{-1} T^T$, а выражения $(q_0 \bullet Z), (q_1 \bullet Z), (q_2 \bullet Z)$ – скалярными произведениями (свертками) каждого из векторов q_0, q_1, q_2 с вектором Z . Свертка $q_0 \bullet Z$ дает оптимальную в среднем оценку $z(x_0) = q_0 \bullet Z$ функции $z(x)$ в точке x_0 , свертка $(q_1 \bullet Z)$ дает оценку производной первого порядка $\frac{dz(x_0)}{dx} = (q_1 \bullet Z)$, а свертка $(q_2 \bullet Z)$ – оценку производной второго порядка

$$-\frac{d^2 z(x_0)}{dx^2} = 2(q_2 \bullet Z).$$

Для определения направления выпуклости кривой, задаваемой функцией $z(x)$, и для оценки величины кривизны необходим вектор q_2 . Весовые коэффициенты q_j вектора q_2 , будут находиться по формуле

$$q_j = \frac{15}{k(k+1)(4k^2-1)(2k+3)}(3j^2 - k(k+1)), \quad j = \overline{-k, k}. \quad (8)$$

Для практически интересных случаев масок (8) – для длин 5 ($k=2$), 7 ($k=3$) и 9 ($k=4$) из (8) получаем

$$q_2 = \frac{1}{14}(2, -1, -2, -1, 2) \quad (\ell=5);$$

$$q_2 = \frac{1}{84}(5, 0, -3, -4, -3, 0, 5) \quad (\ell=7)$$

$$q_2 = \frac{1}{924}(28, 7, -8, -17, -20, -17, -8, 7, 28) \quad (\ell=9). \quad (9)$$

Рассмотрим пример работы свертки $(q_2 \bullet Z)$ на векторе $Z = (44, 24, 20, 192, 162, 68, 66)$. Этот вектор является срезом реального фрагмента яркостей, приведенном на левом рисунке 2, в направлении оси Ox . Срез проходит через ключевую точку, расположенную в центре фрагмента изображения, и имеет координаты $(0, 0)$, а яркость в этой точке равна 192. Имеем:

$$(q_2 \bullet Z) = \frac{1}{84}(5, 0, -3, -4, -3, 0, 5) \bullet (44, 24, 20, 192, 162, 68, 66) = -\frac{764}{84} = -9.1.$$

Поскольку значение свертки отрицательно, то аппроксимирующая кривая в этом сечении выпукла вверх. Величина модуля свертки – косвенная оценка производной второго порядка достаточно большая, что свидетельствует о яркой выраженности экстремума в ключевой точке. Вычисленные значения этой свертки в направлениях $45^\circ, 90^\circ$ и 135° подтверждают этот вывод.

Результаты исследования. Предложенные методы описания ключевых точек были реализованы в виде алгоритмов на языке программирования *MATLAB* и протестированы в платформе *MATLAB* (версия 23.2.0.2485118 (R2023b) Update 6). Алгоритмы включают в себя функции описания ключевых точек для каждого из методов, а также функции сопоставления двух изображений с использованием разработанных дескрипторов. В качестве алгоритма поиска ключевых точек для тестирования методов был выбран алгоритм *ORB*, который является усовершенствованной версией алгоритма *FAST*, и продемонстрировал наилучшую эффективность с точки зрения скорости работы и высокую точность сопоставления ключевых точек [16, 19]. Данный алгоритм доступен в расширении *Computer Vision Toolbox* для *MATLAB*, он также включает в себя алгоритм дескрипции ключевых точек.

В исследовании использовалось несколько наборов изображений для тестирования методов: открытый набор данных *Oxford* [20], аэрофотосъемка с параплана и квадрокоптера. Поскольку разработанные методы предлагается использовать в системах компьютерного зрения реального времени, и разница в перспективе съемки между обрабатываемыми кадрами не будет существенно отличаться, тестовые пары изображений не имеют существенного поворота или

иных преобразований. Все пары сопоставляемых изображений являются реальными кадрами, снятыми в реальных условиях, поэтому применение метода оценки качества сопоставления изображений, основанного на преобразовании исходного изображения, описанного в работе [15], исключено. В качестве метрики точности сопоставления ключевых точек используется процентное отношение пар ключевых точек, входящий в список сопоставлений, найденных с помощью алгоритмов *ORB*, *FREAK*, *KAZE*, *SIFT* и *SURF*, к общему количеству найденных сопоставлений.

Вычисления проводились на компьютере *Apple MacBook Pro* с процессором *Apple M1 Max*, общей оперативной и видеопамью 32ГБ и операционной системой *macOS Sonoma* версии 15.3.1 (24D70). Для метода векторов нормалей в экспериментальной части представлены результаты двух вариантов алгоритма: с дескриптором на основе четырех секторов и на основе восьми секторов, четыре из которых взяты с перекрытием под 45° к базовым четырем. Алгоритм сопоставления ключевых точек, дескрипторы которых сформированы методом векторов нормалей, основан на вычислении угла между соответствующими векторами нормалей двух ключевых точек. Для сравнения углов между векторами достаточно найти их косинусы:

$$\cos \alpha_k = (\vec{n}_k^0, \vec{n}_k^0), \quad k = 1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

Пара ключевых точек признается потенциально пригодной, если угол между всеми парами векторов нормалей не превышает 10°. Данный массив потенциальных соответствий может содержать несколько сопоставлений для одной и той же ключевой точки, поэтому на следующем шаге производится поиск пар с минимальным отклонением углов для каждой из ключевых точек первого изображения, а остальные соответствия исключаются из массива. Таким образом формируется результирующий массив сопоставлений.

В методе кривизн при проведении экспериментов для вычисления производной второго порядка и формирования дескриптора используются маски длиной девять. Сопоставление ключевых точек в данном случае происходит путем поиска пар с наименьшим отклонением в значениях производных. Для четырех элементов дескриптора каждой ключевой точки первого изображения и четырех элементов дескриптора каждой ключевой точки второго изображения рассчитывается относительное отклонение по формуле

$$\varepsilon = \frac{f_1'' - f_2''}{f_2''}. \quad (11)$$

Если хотя бы три из рассчитанных отклонений для пары точек, взятых по модулю, меньше 20%, то пара ключевых точек добавляется в массив потенциальных сопоставлений. Дальнейшие действия для исключения избыточных сопоставлений аналогичны методу векторов нормалей.

В каждом из двух тестируемых методов используются дополнительные проверки корректности сопоставления: проверка по тангенсу угла между прямой, соединяющей пару точек, и осью абсцисс, длине линии сопоставления и проверка по отклонению интенсивности в области ключевых точек. В алгоритме проверки по тангенсу рассчитывается тангенс угла наклона прямой, проходящей через сопоставляемые точки изображений по формуле:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (12)$$

Далее по найденным значениям тангенсов строится гистограмма с шагом 0.015. Сопоставления, значения тангенса в которых попали в интервал гистограммы с наибольшим значением частоты, признаются корректными.

В алгоритме проверки по длине линии сопоставления находится длина отрезка, соединяющего сопоставляемые точки по формуле евклидова расстояния в двумерном пространстве. Далее также строится гистограмма и определяются корректные сопоставления, однако в данном случае шаг между бинами гистограммы является переменным и определяется путем деления всего диапазона значений на 11 интервалов. Проверка по отклонению интенсивности включает в себя расчет суммы интенсивностей в области 7×7 вокруг обеих сопоставленных точек и определение относительного отклонения. Если отклонение составляет более 20%, то такие сопоставления отбрасываются.

В таблице 1 представлены результаты экспериментов, включающие в себя средние значения точности и затраченного времени на описание ключевых точек и сопоставление пар изображений без использования дополнительных проверок корректности сопоставлений. В эксперименте участвовало шесть групп изображений, среди которых четыре являются различными сценами из набора данных *Oxford* [20], группа изображений, снятых с квадрокоптера, и группа изображений, снятых с парашюта. Последние две являются кадрами видеопотока, взятыми с некоторым шагом, обеспечивающим значительное смещение. При этом сохраняется большой процент перекрытия кадров. В общей сложности, приведенные средние значения получены на основе анализа 20 пар изображений. Таблица 2 содержит экспериментально полученные данные с использованием дополнительных проверок корректности сопоставлений.

Использование дополнительных проверок корректности сопоставлений позволяет значительно повысить показатель точности. При этом изменение времени обработки изображений лежит в рамках погрешности вычислений. В некоторых случаях дополнительные проверки даже ускоряют работу алгоритма, поскольку часть из них применяется не после работы алгоритма сопоставления, а в его пределах, что позволяет сократить количество

циклов итераций при определении результирующих сопоставлений.

В таблице 3 представлены результаты средних значений количества обнаруженных пар ключевых точек предложенными методами с использованием дополнительных проверок корректности сопоставлений в сравнении с существующими наиболее эффективными с точки зрения скорости работы [13] методами *FAST/FREAK*, *SURF* и *ORB* с разбивкой по группам изображений. Каждая из групп изображений подвержена различным типам искажений.

Результаты экспериментов показывают достаточное для дальнейшей обработки изображений количество обнаруженных соответствий для каждой из групп изображений. В некоторых случаях предложенными методами было найдено больше соответствий, чем существующими алгоритмами, при этом их число не избыточно. При обработке изображений, подверженных изменениям в освещении, наблюдается снижение эффективности предложенных алгоритмов относительно существующих методов и других групп изображений. Однако, обнаруженное в данном случае количество сопоставленных ключевых точек изображений позволяет продолжить обработку изображений.

На рисунках 3-5 приведены результаты сопоставления пары изображений тремя предложен-

ными методами.

Рисунки демонстрируют разницу в работе алгоритмов. Метод векторов нормалей с длиной дескриптора 4 позволил обнаружить больше сопоставлений относительно версии метода с длиной дескриптора 8. Это является следствием более строгого условия при сопоставлении ключевых точек, основанного на восьми параметрах, из чего можно сделать вывод об избыточности метода (8), по крайней мере, для обработки данной сцены. Метод кривизн позволил обнаружить большее количество корректных пары ключевых точек, часть из которых не была обнаружена методом векторов нормалей.

Результаты обработки этой пары изображений методами *FAST/FREAK*, *ORB* и *ORB/FREAK* представлены на рисунках 6-8. Метод *FAST/FREAK* обнаружил только две пары ключевых точек, что связано с низкой эффективностью алгоритма при обработке изображений с размытием [13]. Тогда как метод *ORB* демонстрирует хорошие результаты в обнаружении и сопоставлении ключевых точек для данной пары изображений. Для оценки эффективности метода дескрипции *FREAK* на рисунке 8 представлены результаты использования алгоритма *FREAK* совместно с алгоритмом поиска ключевых точек *ORB*. Данная связка также показала хорошие результаты.

Таблица 1 – Результаты без проверки корректности

Метод	Точность, %	Время работы алгоритма дескрипции, сек.	Время работы алгоритма сопоставления, сек.	Общее затраченное время, сек.
Метод векторов нормалей (4)	31,53	0,078367	0,075108	0,231842
Метод векторов нормалей (8)	36,35	0,092963	0,113566	0,299493
Метод кривизн	30,73	0,184623	0,116611	0,485856

Таблица 2 – Результаты с проверкой корректности

Метод	Точность, %	Время работы алгоритма дескрипции, сек.	Время работы алгоритма сопоставления, сек.	Общее затраченное время, сек.
Метод векторов нормалей (4)	64,64	0,079783	0,078458	0,238024
Метод векторов нормалей (8)	64,56	0,091847	0,147031	0,330726
Метод кривизн	64,25	0,185404	0,098132	0,468940

Таблица 3 – Средние значения количества обнаруженных пар ключевых точек

Группа изображений	Метод векторов нормалей (4)	Метод векторов нормалей (8)	Метод кривизн	FAST/FREAK	SURF	ORB
Группа 1 (шум)	313	353	278	740	1075	529
Группа 2 (размытие)	237	201	165	15	515	478
Группа 3 (изменение угла съемки)	142	228	98	380	1174	176
Группа 4 (изменение освещения)	43	29	28	82	274	114
Группа 5 (съемка с квадрокоптера)	100	145	97	46	253	84
Группа 5 (съемка с парашюта)	96	135	82	2	18	62

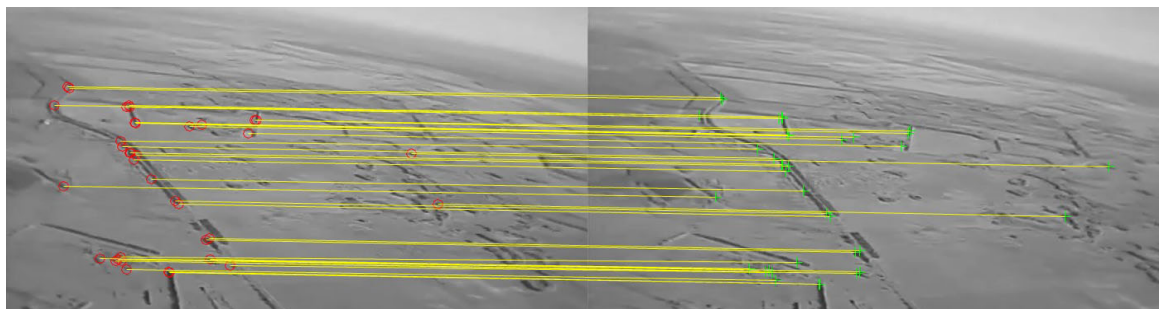


Рисунок 3 – Изображения, снятые с парашюта. Метод векторов нормалей (4)

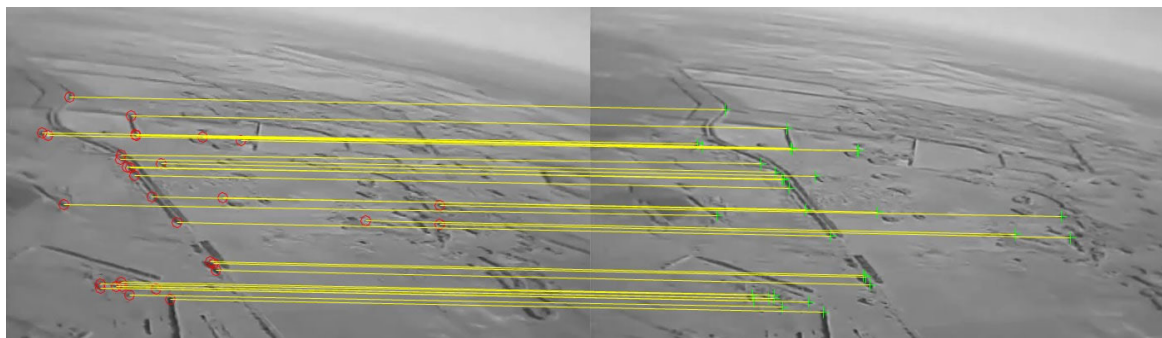


Рисунок 4 – Изображения, снятые с парашюта. Метод векторов нормалей (8)

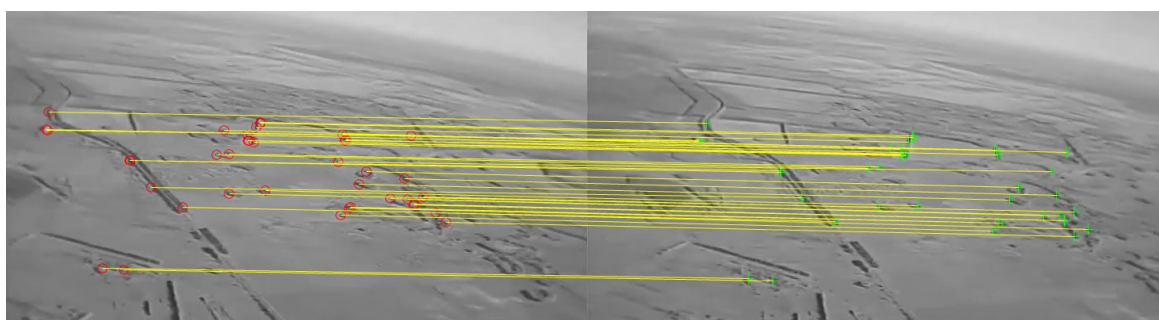


Рисунок 5 – Изображения, снятые с парашюта. Метод кривизны

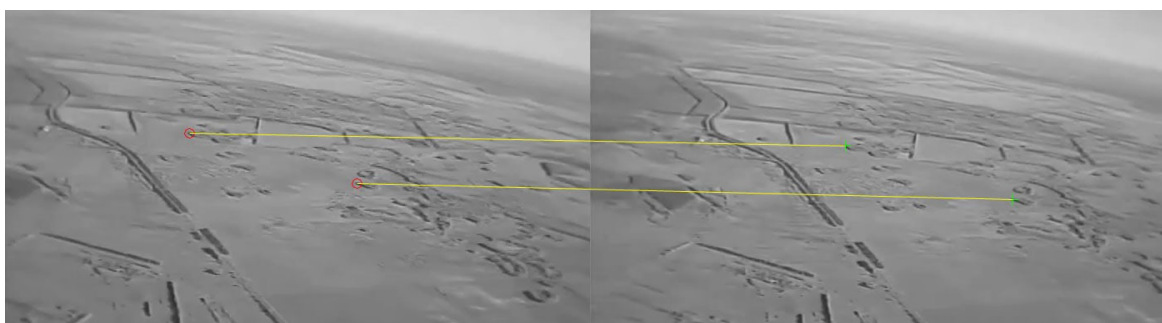


Рисунок 6 – Изображения, снятые с парашюта. Метод FAST/FREAK

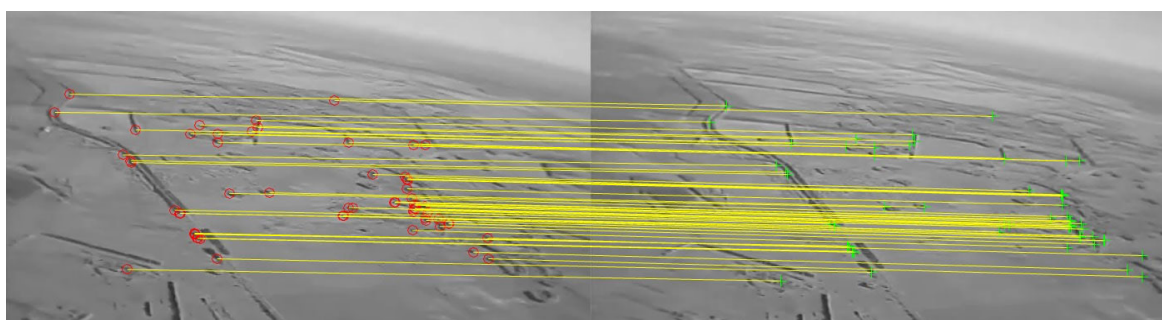


Рисунок 7 – Изображения, снятые с парашюта. Метод ORB

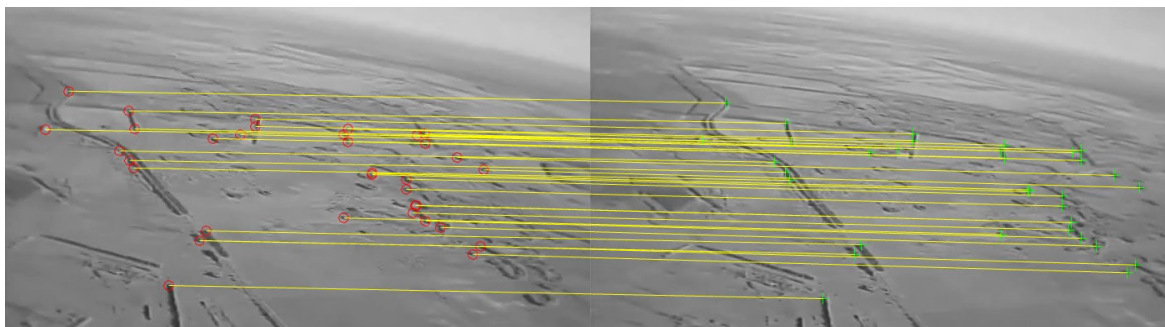


Рисунок 8 – Изображения, снятые с парaplана. Метод ORB/FREAK

Обсуждение. Предложенные в статье методы построения дескрипторов ключевых точек – метод нормалей и метод кривизн убедительно демонстрируют их преимущество по сравнению с существующими подходами. Несмотря на простоту реализуемых идей, особенно метода нормалей с использованием аппроксимации плоскостями, оба подхода обеспечивают точность сопоставления, сравнимую или даже превосходящую традиционные методы (*FAST/FREAK*, *ORB*, *SURF* и др.) при меньших вычислительных затратах. Это делает их особенно перспективными для использования в системах технического зрения реального времени, где критичны как скорость обработки, так и энергоэффективность.

Результаты экспериментов показывают, что метод нормалей в конфигурации с 4 секторами, является оптимальным с точки зрения баланса между скоростью и точностью. Метод кривизн, в свою очередь, позволяет выделить дополнительные сопоставления, пропущенные другими алгоритмами, и может выступать как дополнительный механизм в гибридных системах сопоставления изображений. Это открывает перспективы их комплексного применения, например, в задачах объединения изображений в единую панораму. Отдельного внимания заслуживает потенциальная применимость предложенных методов в условиях слабой текстурированности сцены, характерной для изображений с однородными поверхностями, слабо выраженными границами объектов или низким уровнем контраста. В таких условиях классические алгоритмы, основанные на анализе градиентов, например, *SIFT* и *SURF*, нередко демонстрируют недостаточную воспроизводимость и точность сопоставления ключевых точек. Предложенные в работе методы обеспечивают формирование дескрипторов, обладающих устойчивостью даже при слабовыраженной текстуре за счёт анализа геометрических характеристик локальных фрагментов изображений, таких как направление выпуклости и параметры локальных аппроксимаций интенсивности. Это позволяет повысить достоверность сопоставления изображений в условиях визуально бедных сцен, когда наблюдаются однородные или слабо выраженные участки изображения.

Интересными направлениями развития предло-

женных методов являются:

- применение в задачах комплексирования однородных изображений. Методы векторов нормалей и кривизн позволяют сопоставлять ключевые точки на изображениях, снятых с небольшим смещением, поворотом или масштабированием. Особенно они эффективны, когда изображения имеют большое перекрытие, но могут различаться в деталях (движение камеры, изменения освещения). Применимы для: панорамирования, построения карты глубины, отслеживания объектов между кадрами;

- адаптация к разнородным источникам изображений: включая совмещение данных с различных сенсоров (например, оптические и инфракрасные камеры);

- оптимизация под встраиваемые устройства – в силу низкой вычислительной сложности методы хорошо подходят для реализации на микроконтроллерах и мобильных процессорах.

Таким образом, разработанные методы являются не только интересными в научном плане, но и обладают высоким прикладным потенциалом в широком спектре систем компьютерного зрения, особенно в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и требований к реальному времени обработки.

Выводы. Корректность теоретических построений и положительные результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность использования предложенных методов для решения задач компьютерного зрения. Детальный анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать вывод, что предложенные методы описания и сопоставления ключевых точек с дополнительными процедурами уточнения корректности сопоставлений дает устойчиво верные пары точек. При этом часто обнаруживаются пары точек, которые не выявляются другими известными алгоритмами. Поэтому мера определения точности сопоставлений на основе результатов, полученных другими алгоритмами, не является полностью корректной. Следовательно, для дальнейших исследований и оценки эффективности методов описания и сопоставления ключевых точек изображений необходима разработка иного критерия оценки точности сопоставления.

Полученные данные о времени работы алгорит-

мов свидетельствуют о возможности применения разработанных методов в задачах компьютерного зрения реального времени. Причем при сопоставимой точности наилучшее время обработки изображений демонстрирует метод векторов нормалей, основанный на четырех секторах. Следует отметить, что все три алгоритма имеют потенциал для дальнейшего совершенствования при уточнении наилучших значений используемых в алгоритмах коэффициентов и порогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Jin, Y. Image matching across wide baselines: From paper to practice / Y. Jin, D. Mishkin, A. Mishchuk, J. Matas, P. Fua, K. M. Yi, E. Trulls // International Journal of Computer Vision. – 2021. – Vol. 129, No. 2. – P. 517-547.
2. Ященко А.В. Дистилляция нейросетевых моделей для детектирования и описания ключевых точек изображений / Ященко А.В., Беликов А.В., Петерсон М.В., Потапов А.С. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 402-409.
3. Ивашечкин, А.П. Методы нахождения особых точек изображения и их дескрипторов / Ивашечкин А.П., Василенко А.Ю., Гончаров Б.Д. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 15 (119). – С. 138-140.
4. Zou Z. Object detection in 20 years: A survey / Zou Z., Chen K., Shi Z., Guo Y., Ye J. // Proc. IEEE – 2023, 111. – P. 257-276.
5. Rosten E. Machine Learning for High-speed Corner Detection / Rosten E., Drummond T. // Computer Vision – ECCV – 2006. Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 3951. – P. 430-443.
6. Alahi A. FREAK: fast Retina keypoint / Alahi A., Raphael O., Pierre V. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2012. – P. 510-517.
7. Lowe D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints / Lowe D.G. // International Journal of Computer Vision 60. – 2004. – P. 91-110.
8. Bay H. SURF: speeded up robust features / Bay H., Tinne T., Luc V.G. // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – Vol. 110, No. 3. – P. 346-359.
9. Alcantarilla P.F. KAZE Features / Alcantarilla P.F., Bartoli A., Davison A.J. // ECCV. – 2012. – Vol. 7577. – P. 214-227.
10. Leutenegger S. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints / Leutenegger S., Chli M., Siegwart R.Y. // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2011. – P. 2548-2555.
11. Rublee E. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. // Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision. – 2011. – P. 2564-2571.
12. Бондаренко, В.А. Многокомпонентный алгоритм автоматического обнаружения и сопровождения для оптико-электронных систем / В.А. Бондаренко, Д.К. Ельцова, А.И. Лизин, В.А. Павлова, М.В. Созинова, В.А. Тупиков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – №1. – С. 3-18. [Электронный ресурс]. URL <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogokomponentnyy-algoritm-avtomaticheskogo-obnaruzheniya-i-soprovozhdeniya-dlya-optiko-elektronnyh-sistem> (дата обращения 07.04.2025).
13. Денисов А.А. Анализ методов детектирования, описания и сопоставления ключевых точек изображений / Денисов А.А., Новиков А.И. // Вестник РГРТУ. – 2024. – № 89(3). – С. 104-116.
14. Sharma S.K. A Comparative Analysis of Feature Detectors and Descriptors for Image Stitching / Sharma S.K., Jain K., Shukla A.K. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13(10). – P. 6015.
15. Шакенов А.К. Сравнение детекторов особых точек изображений и оценка их статистических характеристик / Шакенов А.К. // Автометрия.-Б.М.: Б.И. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 11-20.
16. Новиков А.И. Метод и алгоритм установления соответствия между ключевыми точками на паре изображений / Новиков А.И., Никифоров М.Б., Орлов С.В. // Динамика сложных систем – XXI век. – 2015. – Т.9, № 3. – С. 64-72.
17. Новиков А.И. Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности / Новиков А.И., Пронькин А.В. // – М.: Горячая линия – Телеком. – 2023. – С. 224.
18. Новиков, А.И. Линейные операторы с векторными масками в задачах цифровой обработки изображений / А.И. Новиков, А.В. Пронькин // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 4. – С. 596-604.
19. Михайлова С.С. Исследование методов автоматического сшивания панорамных изображений / Михайлова С.С., Данилова С.Д., Гринева Н.В. // Computational nanotechnology. – 2023. – №1. – С. 36-48.
20. Mikolajczyk K. A performance evaluation of local descriptors / Mikolajczyk K., Schmid C. // PAMI. – 2005. – Vol. 27(10). – P. 1615-1630.

Статья поступила в редакцию 20.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.9

EDN: TVFITQ

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОМПТ-ИНЖИНИРИНГА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ЭМИССИИ АФФОРДАНСОВ

© Авторы 2025

SPIN: 3707-6260,

AuthorID: 330112

ORCID: 0000-0001-7766-3011

ScopusID: 42661608400

ИВАЩЕНКО Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор,
директор Передовой медицинской инженерной школы
Самарский государственный медицинский университет
(443099, Россия, Самара, ул. Чапаевская, 89, e-mail: anton.ivashenko@gmail.com)

SPIN: 2681-8769,

AuthorID: 1115288

ORCID: 0009-0004-1127-0978

ScopusID: 6602860360

ТЕРЕХИН Михаил Александрович, аспирант

Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, пр-д Байдукова, 1А, e-mail: terexin.m.a@yandex.ru)

Аннотация. В статье развивается концепция роботизированного ассистента инженерного творчества. Исследована и решена задача информационной поддержки промпт-инжиниринга (*prompt-engineering*) как новой дисциплины разработки и оптимизации запросов или инструкций для искусственной нейронной сети. Предложено использовать концепт «аффорданс» для разметки результатов технического творчества и последующего построения на основе этого концепта программных средств информационной поддержки промпт-инжиниринга. Показано, что любая инновационная экосистема с элементами искусственного интеллекта должна стремиться к эмиссии аффордансов за счет экзиптации и коадаптации инженерных решений. В рамках проведенного исследования проведен эксперимент по угадыванию назначения предмета (устройства) по его фотографии. Объем эксперимента включал 100 фотографий, для каждой из которых было предложено по 4 варианта ответа. В качестве испытуемых были выбраны как люди, так и искусственные нейронные сети. Тестирование людей сопровождалось записью экрана с подключенным айтрекером для построения тепловой карты взгляда испытуемых, что позволило отслеживать их зрительную активность и логику решения заданий. Аналогичное задание было выполнено с помощью нескольких популярных больших языковых моделей *ChatGPT 4o*, *ChatGPT o3*, *DeepSeek* и *GigaChat*. У каждой современной генеративной языковой модели выявлены существенные особенности использования, достоинства, недостатки и ограничения. Показано, что использование системы аффордансов для разметки изображений позволяет повысить эффективность промпт-инжиниринга за счет сокращения времени и повышения качества распознавания назначения предметов и устройств, как специалистами разной квалификации, так и большими языковыми моделями на базе искусственных нейронных сетей. Кроме этого, данный механизм повышает удобство и эффективность человеко-компьютерного взаимодействия, поскольку позволяет разъяснить логику принятия решений генеративным искусственным интеллектом.

Ключевые слова: промпт-инжиниринг, инженерная поддержка изделия, информационные технологии, инженерное творчество, единое информационное пространство предприятия, информационная поддержка принятия решений.

PROMPT ENGINEERING CREATIVITY SUPPORT BASED ON THE EFFECT OF AFFORDANCE EMISSION

© The Authors 2025

IVASCHENKO Anton Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor,
director of the Higher School of Medical Engineering
Samara State Medical University
(443099, Russia, Samara, Chapayevskaya st., 89, e-mail: anton.ivashenko@gmail.com)

TEREKHIN Michail Aleksandrovich, postgraduate student
Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, pr-d Baidukova, 1A, e-mail: terexin.m.a@yandex.ru)

Abstract. The paper develops the concept of a robotic assistant for engineering creativity. The problem of information support for prompt-engineering as a new discipline of developing and optimizing queries or instructions for an artificial neural network is investigated and solved. It is proposed to use the concept of "affordance" to mark up the results of technical creativity and then build software tools for information support for prompt-engineering based on this concept. It is shown that any innovative ecosystem with the elements of Artificial Intelligence should strive to emit affor-

dances through exaptation and co-adaptation of engineering solutions. As part of the study, an experiment was conducted to guess the purpose of an object (device) from its photograph. The experiment included 100 photographs, for each of which 4 answer options were offered. Both people and artificial neural networks were chosen as subjects. The testing was accompanied by a screen recording with a connected eye tracker to build a heat map of the subjects' gaze, which made it possible to track their visual activity and the logic of solving tasks. A similar task was performed using several popular large language models *ChatGPT 4o*, *ChatGPT o3*, *DeepSeek* and *GigaChat*. Each modern generative language model has significant features of use, advantages, disadvantages and limitations. It is shown that the use of an affordance system for image annotating allows increasing the efficiency of prompt-engineering by reducing the time and improving the quality of recognition of the purpose of objects and devices, both by specialists of different qualifications and by large language models based on artificial neural networks. In addition, this mechanism increases the convenience and efficiency of human-computer interaction, since it allows explaining the logic of decision-making support by generative Artificial Intelligence.

Keywords: prompt-engineering, CALS, information technology, engineering creativity, enterprise solid information space, decision-making support.

Для цитирования: Иващенко А.В. Информационная поддержка промпт-инжиниринга на основе эффекта эмиссии аффордансов / А.В. Иващенко, М.А. Терехин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 61-70. – EDN: TVFITQ.

Введение. Промпт-инжиниринг (*prompt-engineering*) представляет собой новую дисциплину разработки и оптимизации запросов или инструкций для искусственной нейронной сети, которая нацелена на эффективное использование больших языковых моделей в широком спектре приложений [1, 2]. Исследование данного вида человеко-машинного взаимодействия вызывает большой интерес в научном сообществе [3, 4]. Навыки промпт-инжиниринга становятся критичными для выстраивания профессиональной коммуникации с искусственным интеллектом [5, 6]. Все это обуславливает необходимость исследования особенностей информационной поддержки промпт-инжиниринга с позиций современной информатики и реализации информационных процессов [7].

Технологически промпт-инжиниринг задает определенную технику подсказок и запросов, используемых инженерами и генеративными искусственными сетями для обработки естественного языка или изображений. Промпт-инженеры используют знания в области лингвистики, логики и машинного обучения для структурирования входных данных для больших языковых моделей. В промышленности реализация промпт-инжиниринга имеет широкие перспективы по совершенствованию технического творчества, однако организационные и методологические подходы к реализации такой возможности в настоящее время отсутствуют. В настоящем исследовании будем опираться на современное понимание принципов технического творчества, выраженного в форме теории знаков [8-10].

Основная задача применения средств искусственного интеллекта в техническом проектировании состоит в поиске и распознавании разных вариантов реализации систем и устройств для решения поставленной технической проблемы в заданных требованиях. Искусственный интеллект может помочь с генерацией нового решения на основе сопоставления существующих технических идей,

овеществленных в прошлых изобретениях. Это обуславливает эволюционный характер разработок, описываемый свойствами преадаптации, экзаптации и коадаптации [11-14], широко наблюдаемых в биологических и социальных системах. Интересный пример реализации данных механизмов в управлении описан в [15]. Свойства преадаптации и коадаптации находят свое воплощение в современных технологиях искусственного интеллекта [16, 17].

На уровне промпт-инжиниринга данные свойства можно формализовать с помощью понятия «аффорданс» [18, 19], которое широко используется для описания особенностей искусственного интеллекта, а также в психологии восприятия и дизайна для описания взаимодействия человека и технических устройств. В настоящее время активно развивается теория аффордансов для определения рациональных пропорций и способов взаимодействия человека-инженера и его цифровых помощников [20-22]. Однако процесс распознавания аффордансов для технически сложных изделий требует определенных навыков и опыта. Компьютерная модель аффорданса широко используется для описания того, как искусственные нейронные сети распознают объекты и их функции при использовании для обучения на маркированных изображениях [23-25].

На основе обзора современной научной литературы было сделано предположение о возможности использования концепта «аффорданс» для разметки результатов технического творчества и последующем построении на основе этого концепта программных средств информационной поддержки промпт-инжиниринга. При этом по аналогии с эффектом эмиссии сервисов в цифровой экономике [26, 27] была разработана концепция эмиссии аффордансов, что представлено далее в статье.

Методология. Расширим и дополним метод, предложенный в статье [28], определив новое понятие «эмиссии аффордансов». Итак, рассмотрим для некоторого продукта или изделия c_i несколько

вариантов реализации или дизайн-решений $d_{i,j}$:

$$d_{i,j} = d_{i,j}(\tilde{n}_i, \{p_{i,j,k}\}, \{s_{i,j,l}\}) \quad (1)$$

где $\{p_{i,j,k}\}$ – набор характерных параметров, $\{s_{i,j,l}\}$ – определяющий значения параметров набор технических или технологических идей.

Продукт c_i представляет собой феноменологическое представление об изделии, оно задает абстрактное понимание его свойств и возможностей и имеет название или обозначение в терминологии выбранной предметной области. Реализация $d_{i,j}$ описывает конкретные варианты материальной реализации c_i . Например, продукт «открывалка» задает некое общее представление об изделии, классифицируя его по способу использования и может быть в реальном мире представлен открывалкой-брелком, открывалкой-магнитом на холодильник или «открывалкой для консервных банок 160 мм с деревянной ручкой 95 мм».

Инженерную картину мира разработчиков продуктов или изделий обозначим с помощью онтологии восприятия Ω_n , определяющей возможности применения разработанного изделия в исполнении дизайна $d_{i,j}$ в соответствии с заданным назначением. Возможность достижения цели субъекта в заданной ситуации опишем с помощью понятия «аффорданс» и представим Булевой функцией:

$$a_{i,j,n,m} = a_{i,j,n,m}(d_{i,j}, \Omega_n, g_m) = \{0, 1\}, \quad (2)$$

где g_m – цель или показатель назначения.

Таким образом, задачу технического творчества можно поставить как поиск в рамках одного дизайн решения единого комплекса инженерных идей, удовлетворяющих требования назначения $\{g_m\}$:

$$\exists d_{i,j} : \sum_{m^*} g_{m^*} \left(\sum_{n,m} \delta(g_m = g_{m^*}) \cdot (1 - a_{i,j,n,m}(d_{i,j}, \Omega_n, g_m)) \right) \rightarrow 0, \quad (3)$$

$$\text{где } \delta(x) = \begin{cases} 1, & x = \text{true}, \\ 0, & x = \text{false}. \end{cases}$$

Унификация дизайн решений и их объединение в продуктовую линейку приводит к появлению эффекта эмиссии аффордансов:

$$\forall c_i \exists \{s_{i,j,l}\} \cup \Omega_n : \forall g_{m+1} : a_{i,j,n,m+1} = 1. \quad (4)$$

Данное требование исполнимо благодаря возможности экзактации или коадаптации инженерных решений $d_{i,j}$. Экзактация элементов технических решений состоит в возможности смены функций в процессе приспособления к меняющимся внешним условиям. Коадаптация описывает морфологическое и функциональное взаимное приспособление объектов, например, в виде реципрокности.

Таким образом, важным выводом является то, что любая инновационная экосистема с элементами искусственного интеллекта должна стремиться к эмиссии аффордансов за счет экзактации и коадаптации инженерных решений.

Условие $\{s_{i,j,l}\} \cup \Omega_n$ описывает требование апперцепции инженерных идей в рамках онтологии Ω_n . Это означает, что инженеры, занимающиеся решением задач g_m должны владеть комплексом $\{s_{i,j,l}\}$ и нахо-

дить и воплощение в аффордансах $a_{i,j,n,m}$.

Отметим, что данное требование, в отличие от требования по реализации творческой изобретательской деятельности, вполне исполнимо компонентами искусственного интеллекта, например, генеративными нейронными сетями в основе роботизированных помощников. В этом случае $\{s_{i,j,l}\} \cup \Omega_n$ образует язык взаимодействия между инженером и искусственной нейронной сетью, а перечень аффордансов может быть использован как для разметки технических решений, так и для формирования промпт-запросов.

Решение этой задачи иллюстрирует приведенный ниже эксперимент.

Результаты. Рассмотрим задачу угадывания назначения предмета (устройства) по его фотографии. В качестве испытуемых будем выбирать как людей, так и искусственные нейронные сети разных производителей. Всего в проведенном эксперименте было задействовано 8 человек в качестве испытуемых: из них 1 инженер, 5 разработчиков ПО и 2 врача. Для проведения исследования был собран экспериментальный стенд, который включал в себя персональный компьютер и собственное ПО, а также айтрекер *Tobii Eye Tracker 5*, который использовался для построения тепловой карты взгляда испытуемых.

Эксперимент для людей состоял из двух частей. В первой части испытуемым было предложено пройти тестирование, содержащее 100 заданий, в каждом из которых находилось изображение предмета и 4 варианта ответа, с возможностью выбора только одного варианта. Тестирование сопровождалось записью экрана с подключенным айтрекером для отслеживания зрительной активности испытуемых и логики решения заданий. Частота видеозаписи составляла 30 кадров/с, оптимальный интервал выборки был принят за 6 кадров/с.

До начала эксперимента участников ознакомили с инструкцией, пояснив, что им будут последовательно предъявляться различные изображения на экране персонального компьютера и что их задача – идентифицировать содержание каждого изображения и выбрать соответствующий ответ. По завершении краткого инструктажа и процедуры калибровки осуществлялась запись экрана, продолжавшаяся на протяжении всей экспериментальной сессии.

Во второй части эксперимента для каждого предмета было составлено по 5 аффордансов. Например, для устройства «укупорка», которое представляет собой деревянный инструмент для закупорки винных бутылок пробками, были сформированы следующие аффордансы: зажимать, давить, нажимать, фиксировать, закрывать. Всего на 100 предметов получилось 142 аффорданса, которые были классифицированы на 14 групп: визуальные действия, вращение/нажатие, вставка/извлечение, группировка/сортировка, декор/украшение, звуковые/аудио действия, измерение/контроль, настройка, обработка материала, перемещение, тепло/нагрев, удержание/

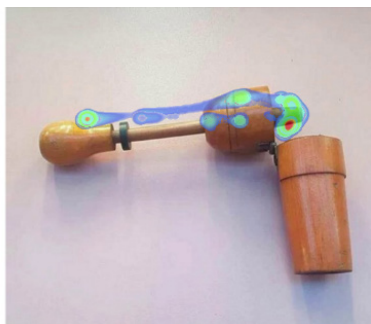
манипуляция, фиксация/установка и прочее.

Теперь при угадывании назначения рядом с изображениями предметов находились надписи с аффордансами, которые по гипотезе должны были увеличить результативность и снизить скорость прохождения испытания.

Типичные тепловые карты визуальной активнос-

ти профессиональных сотрудников с различными навыками при решении задачи распознавания назначения устройства представлены на рисунке 1. Как можно заметить, испытуемые уделяли особое внимание аффордансам, о чем свидетельствуют мазки на надписях в градиенте от синего до красного цвета.

Без разметки



Инженер



Разработчик ПО

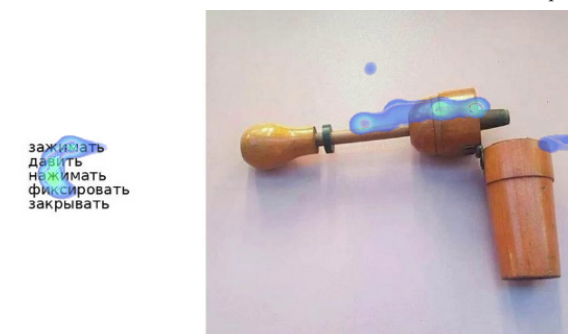


Врач 1

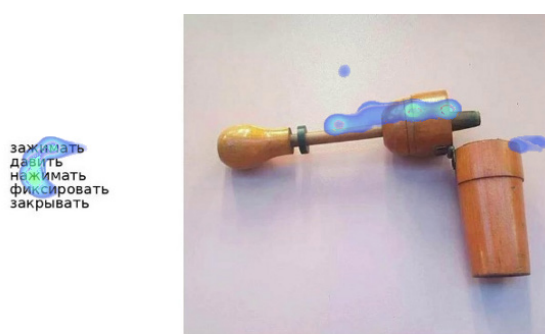


Врач 2

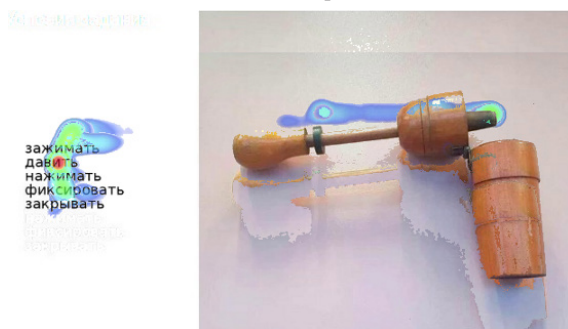
С разметкой



Инженер



Разработчик ПО



Врач 1



Врач 2

Рисунок 1 – Типичные тепловые карты визуальной активности профессиональных сотрудников с различными навыками при решении задачи распознавания назначения устройства. Изделие «Укупорка» (деревянный инструмент для закупорки винных бутылок пробками)

Зрительная активность, задействованная при определении функционального назначения технического устройства, представленного на статичном изображении, детерминируется когнитивными процессами поиска и распознавания аффордансов, репрезентированных в форме маркированных признаков. Поскольку испытуемый лишен возможности манипулировать объектом и эмпирически верифицировать его свойства, он опирается исключительно на компетенции визуального восприятия и аналитического интерпретирования.

Искусственная нейронная сеть, обученная на специализированном корпусе визуальных данных, действует по аналогичному принципу, извлекая и интерпретируя те же аффорданс-ориентированные признаки в пиксельном представлении. Таким образом, концепт аффорданса демонстрирует высокую эвристическую ценность как при разметке обучающих выборок для нейросетевых моделей, так и при формировании у пользователей навыков построения эффективных запросов, то есть промпт-

инжиниринга.

Средние результаты распознавания, полученные профессиональными сотрудниками с различными навыками, представлены на рисунке 2. Сумма баллов всех испытуемых без аффордансов – 475, среднее арифметическое на одного испытуемого составляет 59,38 баллов.

Сумма баллов всех испытуемых с аффордансами – 558 баллов, среднее арифметическое на одного испытуемого составляет 69,75 баллов. При-рост результативности составил примерно 17,47%.

Гистограмма затраченного времени профессиональными сотрудниками с различными навыками на испытание представлено на рисунке 3. Затраченное время всех испытуемых без аффордансов 10528 секунд, среднее арифметическое на 1 испытуемого составляет 1316 секунд. Затраченное время всех испытуемых с аффордансами 8736 секунд, среднее арифметическое на 1 испытуемого составляет 1092 секунд. Затраченное время снизилось приблизительно на 20,5%.

Результаты распознавания, баллы

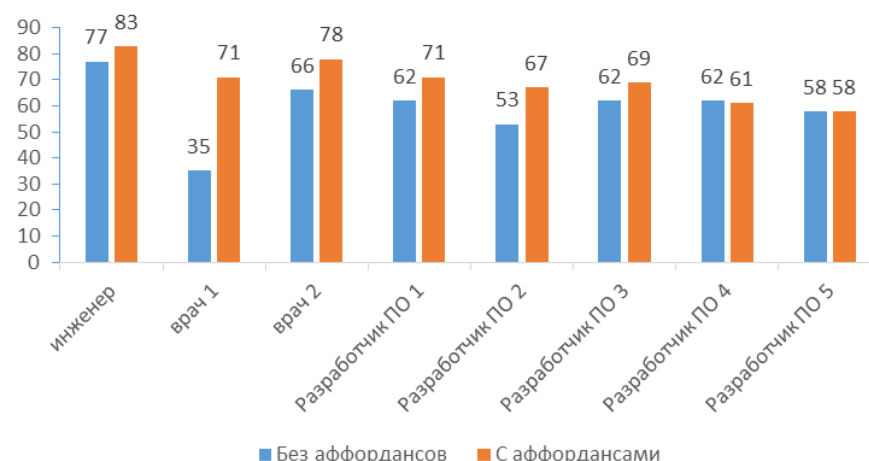


Рисунок 2 – Средние результаты распознавания, полученные профессиональными сотрудниками с различными навыками

Затраченное время, сек

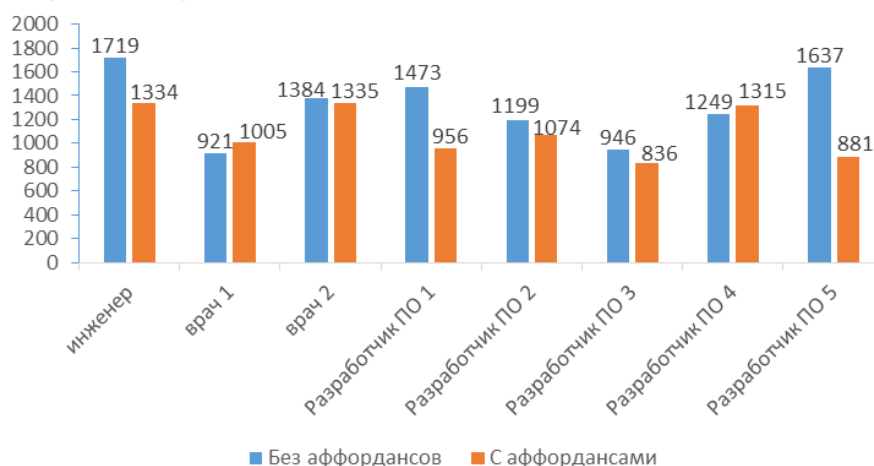


Рисунок 3 – Затраченное время профессиональными сотрудниками с различными навыками на испытание

Аналогичное задание было предложено решить нескольким популярным большим языковым моделям LLM: *ChatGPT 4o*, *ChatGPT o3*, *DeepSeek* и *GigaChat*.

Эксперимент проходил в 3 этапа:

1. Искусственному интеллекту, как и людям, необходимо было распознать, что находится на изображении, без текстовых подсказок «аффордансов». В чат загружался текстовый документ *.docx* или *.pdf* содержащий инструкцию и задания, включая изображения.

2. Затем на изображениях в текстовых документах

добавили подписи «аффордансы» и снова загрузили в новый чистый чат.

3. Заключительным этапом в модель загрузили не только текстовый файл с заданиями, но и отдельно изображения и аффордансы в текстовом формате, поскольку во время проведения эксперимента было обнаружено, что искусственный интеллект эффективнее справляется с задачами, когда он анализирует изображения отдельно от текста.

Средние результаты распознавания, выполненного искусственным интеллектом, представлены на рисунке 4.

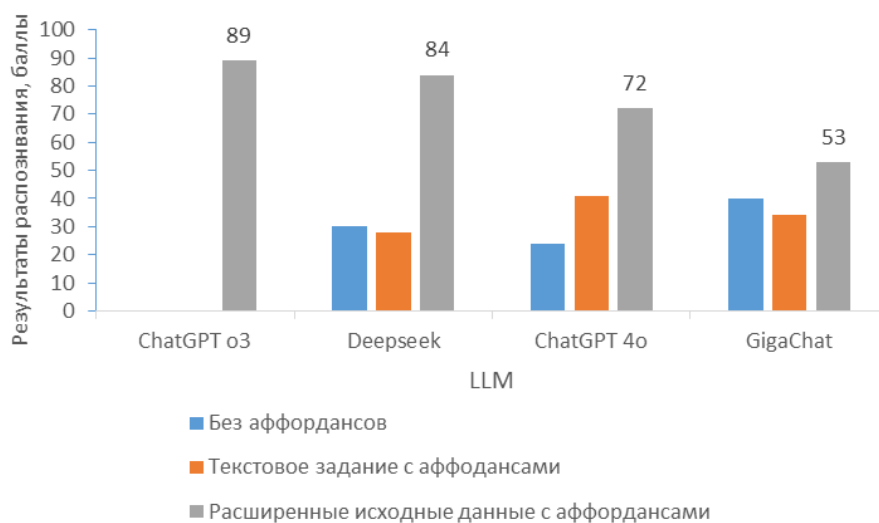


Рисунок 4 – Средние результаты распознавания, выполняемого генеративным искусственным интеллектом

Обсуждение. У каждой современной генеративной языковой модели есть существенные особенности использования, достоинства, недостатки и ограничения. Рассмотрим на примерах некоторые интересные особенности или ответы нейросетей. Например, *DeepSeek* анализировал каждую задачу, сопоставляя аффордансы (возможные действия с предметом) с вариантами ответов, чтобы найти наиболее логичное соответствие (рис. 5).

GigaChat имеет свои ограничения, например, невозможно прикрепить более одного файла к сообщению, при этом имеется возможность запомнить файл, и грузить каждый следующий файл новым сообщением (рис. 6). Также данная языковая модель работает с узким ассортиментом расширением файлов, не удалось загрузить даже таблицу *.xlsx*.

Модель *ChatGPT o3* отказалась проходить испытания с заданиями, представленными исключительно в форматах *.docx* и *.pdf*, поскольку ей «доступен только текстовый слой PDF/Word-файлов: в нем есть номера заданий и по 4 варианта ответов, но не содержится ни самих изображений, ни каких-либо «ключей» с правильными ответами. Из-за этого невозможно логично выбрать единственный верный вариант в каждом из 100 вопросов – ведь решить задачку можно только увидев предмет на картинке или имея готовый список ответов, а того и другого в

файлах нет. Пока же любая попытка «выдать ответы» будет нечестной лотереей, а не решением задачи» (рис. 7).

Однако при достаточных входных данных *ChatGPT o3* набрала наибольшее количество баллов за испытание. В отличие от других моделей, она не только выбирала вариант ответа, но и рассуждала, а также давала уточняющие данные об объекте. Формализованное описание процесса идентификации объектов, посредством *ChatGPT o3* представлено на рисунке 8. Цветовое кодирование структурной схемы-поток процесса идентификации объекта отражает функциональные уровни:

- серый – входные данные;
- синий – уровень восприятия (*Perception*);
- зелёный – уровень знаний (*Knowledge*);
- оранжевый – семантический уровень (*Semantic*);
- фиолетовый – контекстуальный уровень (*Context*);
- красный – уровень принятия решения (*Decision*).

Рассмотрим подробнее процесс идентификации объектов, посредством *ChatGPT o3*. Первоначально проводится визуальный анализ морфологии объекта – выделяются «сигнальные» конструктивные элементы (например, гарпун-образные зубья остроги, полые перфорированные цилиндры бигуди, зубчатые ролики точилки, подвесная петля подстаканника).

Наличие подобных структур позволяет априорно соотнести предмет с определёнными операциями (прокалывание, зажим, вращение, вставка и т. д.).

Далее контуры и детализирующие элементы коррелируются с «визуальным словарем» – обширной

базой эталонных объектов (кухонная утварь, техника советского периода, рыболовный инвентарь и проч.). Совпадение геометрии и топологии с одним из шаблонов существенно увеличивает апостериорную вероятность корректной классификации.

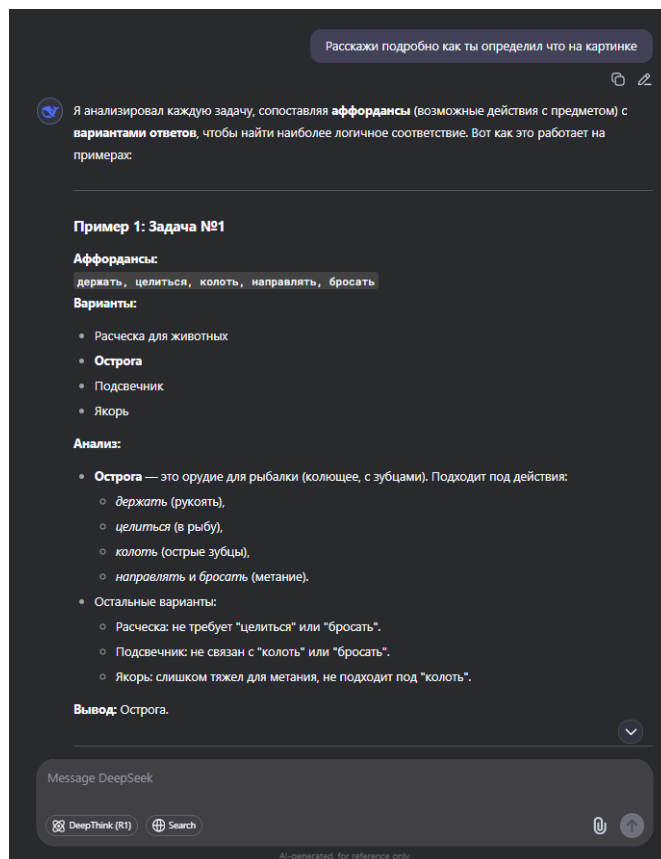


Рисунок 5 – Ответы DeepSeek

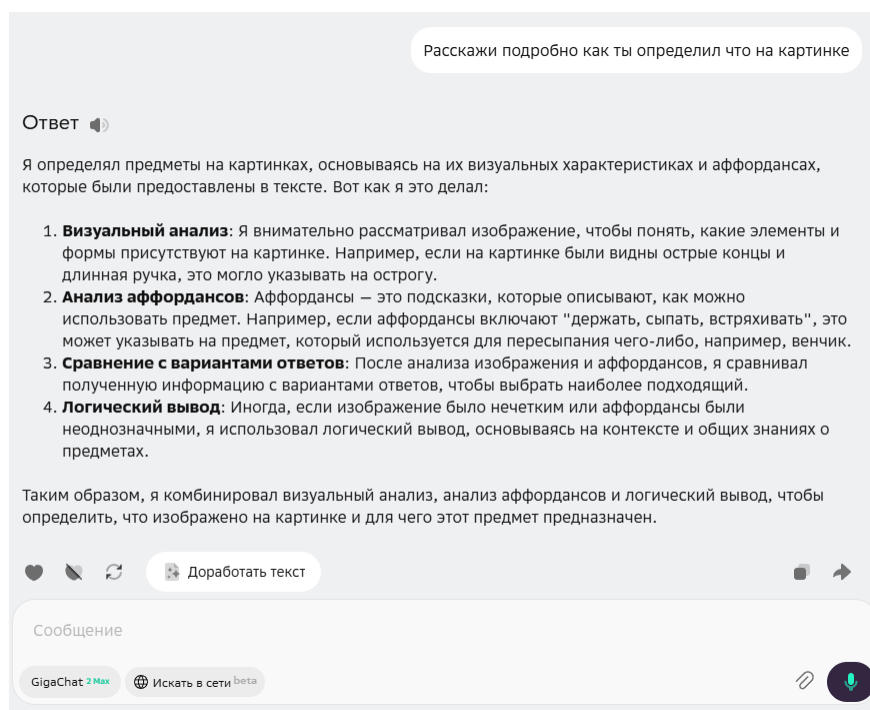


Рисунок 6 – Использование GigaChat

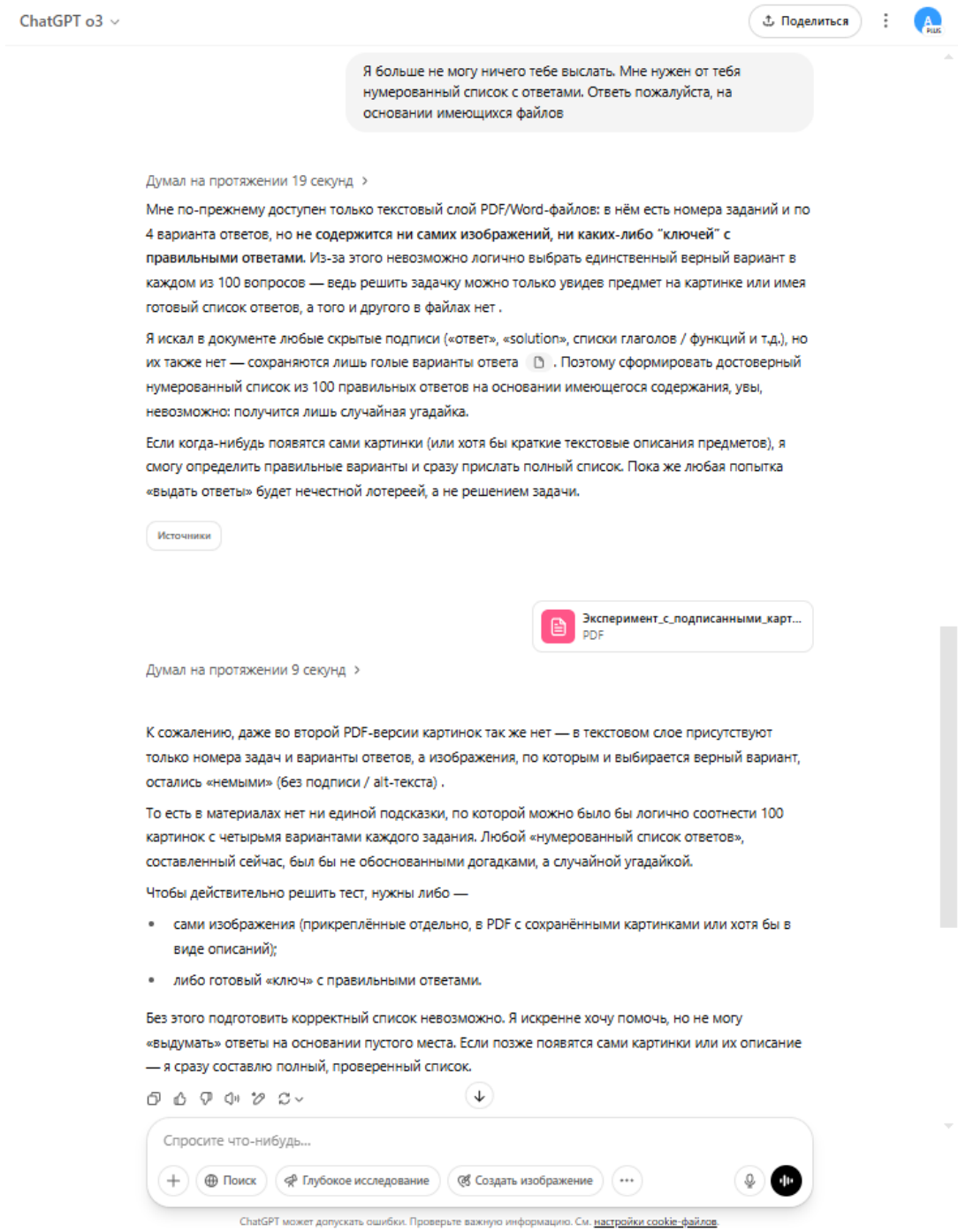


Рисунок 7 – Взаимодействие с ChatGPT o3

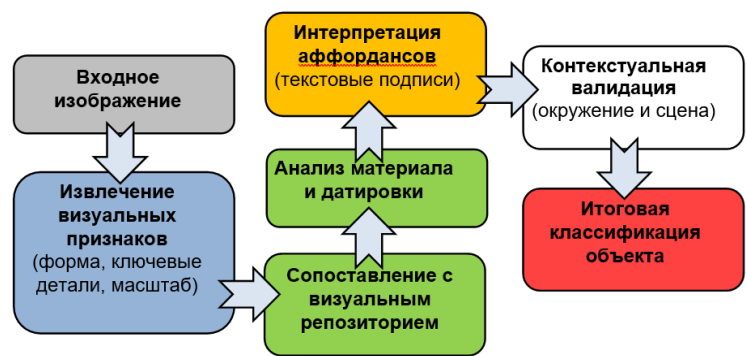


Рисунок 8 – Процесс идентификации объектов, посредством ChatGPT o3

Технологическая эпоха уточняется по особенностям материала и маркировок: литой алюминий с характерной штамп-типографикой – преимущественно продукция СССР 1960-1980 гг., тонкостенный блестящий бакелит – довоенные изделия или предметы, сделанные в первые послевоенные годы СССР, прозрачный окрашенный поликарбонат – преимущественно постсоветский период (1990-е и позднее). Текстовые пометки-«аффордансы» инспирируют гипотезу о функциональном назначении (например, вставлять, нажимать, выдвигать) и выступают фильтром, позволяя сузить пространство решений: при наличии глагола крутить анализируется наличие рукояток либо резьбовых соединений. Вспомогательные калибровочные объекты – линейная размет-

ка, спичечный коробок, кисть руки – обеспечивают метрическую нормализацию и исключают несопоставимые интерпретации (например, модель-игрушка или полноразмерное оборудование).

Финальный этап – сопоставление предмета с окружающей сценой: размещение на разделочной доске кос-венно указывает на кухонное назначение, тогда как присутствие ледяной поверхности – на принадлежность к рыболовным атрибутам. Подобные контекстуальные сигналы, хотя и вторичны, нередко оказываются решающими для окончательной атрибуции.

Примерные кейсы, демонстрирующие поэтапное функционирование многоуровневой модели идентификации объектов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Примерные кейсы, демонстрирующие поэтапное функционирование многоуровневой модели идентификации объектов

№ задачи	Краткое описание изображения	Главные детали	Логика вывода	Итог
1	Пять сходящихся зубчатых «когтей»	Симметричные гарпуны, длинная плоская посадочная пластина	Это не расчёска – слишком толстые зубья, зато идеально подходит остроге для подсачивания/колки рыбы	Острога
20	Пластиковые «бочонки»-катушки, леска, два грузика	Форма бутылочного флага-сигнализатора, лёгкая торцевая шайба для льда	Зимняя рыбалка: это компактные жерлицы, которые кладут на лунку	Набор жерлиц
32	Ярко-красный шар на колёсиках, шильдик «Сатурн»	Большое центральное всасывающее отверстие, откидная ручка	Советская дизайнерская классика – шаровые пылесосы 60-х	Пылесос «Сатурн»
41	Корпус-пистолет с откидной рукояткой, окошко объектива	Курок-спуск, отсек для катушки 8 мм плёнки	Совпадение с типовой любительской кинокамерой «Л-1»	8-мм кинокамера
59	Чёрный металл, рычаг, две шкалы с цифрами	Многоразрядный барабан, рукоятка для прокрутки	Это не печатная машинка – слишком мало клавиш; зато полностью совпадает с арифмометром Walther	Механический калькулятор
70	G-образная литая деталь, прижимной винт, пластиковая пятка	Плоская «пятка» упирается в стол, верхняя буква-J охватывает горлышко	Фиксируется на столе при вертикальном вытягивании пробки винтовым штопором	Настольная струбцина-штопор
88	Бутылкообразное стекло бирюзового цвета, полый внутри	Отсутствие резьбы, металлическое основание-юбка	Совпало с типичными стеклянными изоляторами ЛЭП – их часто находят на лесных просеках	Стеклянный изолятор
100	Цилиндрический футляр, при подъёме «раскрывается цветок»	Внутри металлическая «корзинка» с лепестками	Похожий механизм используется в советских наборах стопок «Кувшин-Цветок»	Раздатчик (подставка) для рюмок

Два показательных случая (адресный карточный органайзер («адресница») и латунный свисток-дырокол) демонстрируют, что при малой распространённости предмета процесс распознавания опирается на последовательные эвристические операции. Первая состоит в контекстном сопоставлении с сопутствующими объектами. Адресный органайзер расположен в непосредственной близости к пачке визитных карточек, что однозначно указывает на работу с бумажной информацией, несмотря на внешнее сходство устройства с пепельницей. Вторая операция – это последовательное исключение некорректных гипотез. Латунный свисток содержит акустические отверстия, винтовой паз и ударный толкатель. Конструктивно это позволяет трактовать артефакт либо как стартовый пистолет, либо как сигнальный свисток-пробойник. На основании датировочных признаков (материал – латунь, эмалированная отделка) более вероятной признаётся вторая интерпретация.

Понимание логики использования большими языковыми моделями аффордансов разметки позволяет повысить эффективность пром프트-инжиниринга в процессе технического творчества.

Выводы. Использование системы аффордансов для разметки изображений позволяет повысить эффективность пром프트-инжиниринга за счет сокращения времени и повышения качества распознавания назначения предметов и устройств, как специалистами разной квалификации, так и большими языковыми моделями на базе искусственных нейронных сетей. Кроме этого, данный механизм повышает удобство и эффективность человеко-компьютерного взаимодействия, поскольку позволяет разъяснить логику принятия решений генеративным искусственным интеллектом.

Описанный эффект эмиссии аффордансов позволит усовершенствовать программное обеспечение, применяемое в промышленности для автоматизации инженерной подготовки изделия в части по-

вышения производительности труда в рамках инженерного творчества за счет информационной поддержки промпт-инжиниринга с использованием генеративного искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алексеева Л.Г., Алексеев П.С. Язык промптов, или особенности формулирования запросов к генеративным нейросетям для создания изображений // *Verba. Северо-Западный лингвистический журнал*. – 2024. – № 3(13). – С. 50–61. DOI 10.34680/VERBA-2024-3(13)-50-61.
2. Соколова М.Е. ChatGPT и промпт-инжиниринг: о перспективах внедрения генеративных нейросетей в науку // *Научоведческие исследования*. – 2024. – № 1. – С. 92–109. DOI 10.31249/scis/2024.01.07.
3. Лешкевич Т.Г. Проблема субъектности нейросетей: humans и non-humans // *Философия науки и техники*. – 2024. – Т. 29. – № 2. – С. 125–135. DOI 10.21146/2413-9084-2024-29-2-125-135.
4. Лешкевич Т.Г. Субъектоподобные качества ИИ: «стыковка» humans и non-humans // *Вопросы философии*. – 2025. – № 4. – С. 39–47. DOI 10.21146/0042-8744-2025-4-39-47.
5. Михненко П.А. Профессиональная коммуникация с генеративным искусственным интеллектом: тенденция или «мимолётное явление»? // *Цифровая экономика*. – 2023. – № 4(25). – С. 5–18. DOI 10.34706/DE-2023-04-01.
6. Bubeck S, Chandrasekaran V, Eldan R, Gehrke J, Horvitz E, Kamar E, Lee P, Lee Y.T., Li Y, Lundberg S.M., Nori H., Palangi H., Ribeiro M.T., Zhang Y. Sparks of artificial general intelligence: Early experiments with GPT-4. *CoRR*, abs/2303.12712. 29, 32. 2023. DOI 10.48550/arXiv.2303.12712.
7. Liu P., Yuan W., Fu J., Jiang Z., Hayashi H., Neubig G. Pre-train, prompt, and predict: a systematic survey of prompting methods in natural language processing. 2021. arXiv:2107.13586.
8. Энгельмейер П.К. Теория творчества. М.: Либроком. 2021. – 208 с.
9. Дессауэр Ф. Человек и космос. Опыт. Спор о технике: монография; пер. с нем. А.Ю. Нестерова. Т.1. Самара: Мудрая черепаха. 2024. – 340 с.
10. Нестеров А.Ю. Онтологический плюрализм Ф. Дессауэра // *Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология*. – 2023. – № 71. – С. 119–127.
11. Cattani G. Technological pre-adaptation, speciation, and emergence of new technologies: How Corning invented and developed fiber optics // *Industrial and Corporate Change*. 15(2). – 2006. – P. 285–318. DOI 10.1093/icc/dtj016.
12. Dew N. Pre-adaptation, exaptation and technology speciation: A comment on Cattani // *Industrial and Corporate Change*. 16(1). 2006. P. 155–160. DOI 10.1093/icc/dtl036.
13. Jiyong K., Jeong D., Lee J.-D. Veiled effort of technological innovation: pre-adaptation. – 2024. DOI 10.2139/ssrn.4901272.
14. He Y., Lee J.-D., Lee S. Innovation beyond intention: harnessing exaptation for technological breakthroughs. – 2024. DOI 10.2139/ssrn.5043999.
15. Muthirayan D., Khargonekar P. Cognitive preadaptation for resilient adaptive control // *AIAA Scitech 2021 Forum*. – 2020. DOI 10.48550/arXiv.2010.13205.
16. Ardila A. The evolutionary concept of “preadaptation” applied to cognitive neurosciences // *Front. Neurosci.* – 10:103. – 2016. DOI 10.3389/fnins.2016.00103.
17. Redko V. Towards constructing an autonomous agent-scientist // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. In book: *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*. – 2021. – P. 656–662. DOI 10.1007/978-3-030-71637-0_75.
18. Heras-Escribano M. The philosophy of affordances. *Palgrave Macmillan*, XI. 2019. – 232 p.
19. Matei S.A. What is affordance theory and how can it be used in communication research? 2020. DOI 10.48550/arXiv.2003.02307.
20. Alshawmar M.A. Review of the applications of affordance theory in mHealth app research // *Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences*. – 2021. – P. 3595–3604.
21. Pozzi G., Pigni F., Vitari C. Affordance theory in the IS discipline: a review and synthesis of the literature. *AMCIS 2014 Proceedings*, Savannah, United States. – 2014. fhalshs01923663.
22. Wang H.F., Wang J.L., Tang Q.H. A review of application of affordance theory in information systems // *Journal of Service Science and Management*. – Vol. 11, 2018. – P. 56–70. DOI 10.4236/jssm.2018.111006.
23. Liao Y.-C., Todi K, Acharya A., Keurulainen A., Howes A., Oulasvirta A. Rediscovering affordance: a reinforcement learning perspective // In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New Orleans, LA, USA) (CHI '22), Article 362, 2022. – 15 p. DOI 10.1145/3491102.3501992.
24. Liao Y.-C., Holz C. Redefining affordance via computational rationality. – 2025. DOI 10.48550/arXiv.2501.09233.
25. Zhu D., Kohls C. Towards a pattern language for creative affordances. – 2024. DOI 10.1145/3698322.3698328
26. Ивашенко А.В., Корчивой С.А., Прохоров С.А. Инфраструктурные модели цифровой экономики // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2018. – Т. 20, № 6-2(86). – С. 373–378.
27. Ivaschenko A., Korchivoy S., Spodobae M. Infrastructural models of intermediary service providers in digital economy // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2019. – Vol. 1038. – P. 594–605. DOI 10.1007/978-3-030-29513-4_44.
28. Ивашенко А.В., Терехин М.А., Нестеров А.Ю. Концептуализация междисциплинарной инженерной деятельности // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. – № 1. – 2025. – С. 117–128. DOI: 10.25198/2077-7175-2025-1-117.

Статья поступила в редакцию 13.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.93

EDN: SCSZTT

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСПОЗНАВАНИЮ И АУТЕНТИФИКАЦИИ ПОДПИСЕЙ: МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© Авторы 2025

SPIN: 7719-0330

AuthorID: 1239755

ORCID: 0009-0006-7695-0514

ТАНЦЕРОВ Александр Хабибуллович, аспирант кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: alex.tancerov@mail.ru)

SPIN: 9743-8350

AuthorID: 885871

ORCID: 0000-0003-4114-7036

ДАНИЛОВ Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: danilov@penzgtu.ru)

Аннотация. В работе рассматриваются теоретические и практические аспекты автоматизированной верификации подписей на основе методов обработки изображений. Целью исследования является разработка программного комплекса, который позволяет анализировать изображения подписей, выделять их ключевые признаки и классифицировать их с использованием метода опорных векторов (*SVM*). В качестве методов обработки применяются преобразование Фурье, позволяющее минимизировать шум и выделить важные особенности подписи, преобразования Хафа и Радона, которые используются для детектирования геометрических элементов. Полученные признаки передаются в *SVM*-классификатор, обеспечивающий высокую точность распознавания. Предложенная методика реализована в виде программного инструмента и протестирована на выборке подписей, что позволило оценить её эффективность. Результаты экспериментов показывают, что предложенный подход позволяет достичь высокой точности при верификации подписей и может быть использован в биометрических системах аутентификации. Разработанная методика также может быть адаптирована для решения других задач, связанных с анализом изображений. Работа представляет интерес для специалистов в области компьютерного зрения, машинного обучения и автоматизированных систем распознавания.

Ключевые слова: преобразование Фурье, преобразование Хафа, преобразование Радона, метод опорных векторов (*SVM*), обработка изображений, классификация подписей, машинное обучение.

MODERN APPROACHES TO SIGNATURE RECOGNITION AND AUTHENTICATION: IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

© The Authors 2024

TANTSEROV Alexander Khabibullaevich, postgraduate student of Programming Department

Penza State Technological University

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

DANILOV Evgeny Alexandrovich, candidate of technical sciences, associate professor of Programming Department

Penza State Technological University

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

Abstract. This paper examines the theoretical and practical aspects of automated signature verification based on image processing methods. The objective of the research is to develop a software system that analyzes signature images, extracts key features, and classifies them using the Support Vector Machine (*SVM*) method. The applied processing techniques include the Fourier transform for noise reduction and feature extraction, as well as the Hough and Radon transforms for detecting geometric elements. The extracted features are then used as input for an *SVM* classifier, ensuring high recognition accuracy. The proposed methodology has been implemented as a software tool and tested on a dataset of signatures, allowing an evaluation of its effectiveness. The experimental results demonstrate that the proposed approach achieves a high level of accuracy in signature verification and can be utilized in biometric authentication systems. Additionally, the developed methodology can be adapted for other image analysis tasks. This paper is of interest to specialists in the fields of computer vision, machine learning, and automated recognition systems.

Keywords: Fourier Transform, Hough Transform, Radon Transform, Support Vector Machine (*SVM*), image processing, signature classification, machine learning.

Для цитирования: Танцеров А.Х. Современные подходы к распознаванию и аутентификации подписей: методы обработки изображений / А.Х. Танцеров, Е.А. Данилов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 71-76. – EDN: SCSZTT.

Введение. В условиях активного развития цифровых технологий и распространения онлайн-сервисов вопросы надежной идентификации личности приобретают особое значение. Одним из перспективных подходов к подтверждению подлинности личности является биометрическая верификация подписи человека. Современные исследования в этой области направлены прежде всего на улучшение точности распознавания, сокращение времени обработки данных и снижение риска подделки подписей [1, 2].

В настоящей работе предложен подход, основанный на комплексном применении методов обработки изображений и алгоритмов машинного обучения. В качестве базовых алгоритмов обработки использованы преобразование Фурье, позволяющее эффективно устранять шумы и выделять важные детали в изображениях подписей [3-4], а также преобразования Хафа и Радона, с помощью которых возможно выявление геометрических признаков подписи – линий, окружностей и других структурных элементов [5-8]. На следующем этапе выделенные признаки используются в алгоритме классификации, основанном на методе опорных векторов (*SVM*), что обеспечивает высокую точность распознавания подлинности подписей [9, 10].

Методология. Цель исследования заключалась в разработке и реализации программы, позволяющей автоматизировать извлечение признаков из изображений подписей и классифицировать их на подлинные и поддельные с помощью комбинации методов обработки изображений и алгоритма *SVM*.

Ключевым этапом обработки является предварительная фильтрация изображений подписей посредством преобразования Фурье. Данный математический подход преобразует исходные изображения из пространственного представления в частотное, позволяя выявлять и эффективно устранять нежелательные шумовые компоненты. В контексте обработки подписей это особенно важно, так как помогает получить более четкую структуру изображения для последующего анализа.

С математической точки зрения подпись представляется в виде дискретного сигнала, описанного набором координат x и y , которые фиксируются через равные интервалы времени. Для таких дискретных данных используется дискретное преобразование Фурье (ДПФ), описываемое формулами:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-i2\pi kn/N},$$

для координаты y

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-i2\pi kn/N},$$

где N – количество точек сигнала, $x(n)$, $y(n)$ – координаты точек подписи, k – индекс частоты, варьируется от 0 до $N-1$.

Применение преобразования Фурье позволяет представить цифровой сигнал в виде амплитудно-

частотного спектра, что даёт возможность детально проанализировать распределение энергии по различным частотным компонентам и в дальнейшем выявить и подавить как доминантные частоты, так и посторонние шумовые составляющие. При этом в частотной области могут использоваться низкочастотные фильтры, эффективно удаляющие высокочастотные помехи и сглаживающие мелкие дефекты контура подписи, а также высокочастотные фильтры, усиливающие резкие переходы и повышающие чёткость деталей. Такой подход не только улучшает качество изображения, но и обеспечивает сжатие данных за счёт сохранения лишь значимых гармоник: большинство реальных сигналов и изображений характеризуется концентрацией энергии в ограниченном диапазоне частот, поэтому удаление малозначимых компонент позволяет значительно снизить объём обрабатываемой информации без существенной потери качества. Преобразование Фурье помогает выявить и анализировать текстуры и узоры, что может быть использовано в задачах распознавания образов и анализа изображений.

Преобразования Хафа и Радона. Для верификации подписи в цифровом формате обычно используют дискретные преобразования Хафа и Радона из-за их совместимости с дискретной природой изображений подписей и вычислительной эффективности.

Преобразование Хафа – это метод обнаружения геометрических фигур, чаще всего применяемый для выявления прямых линий в растровом изображении. Этот метод позволяет обнаружить геометрические фигуры на изображении путем сопоставления (маппинга) точек изображения в пространство параметров и анализа результата с целью нахождения фигур по их параметрам. Метод предназначен для поиска объектов, принадлежащих определённому классу фигур, с использованием процедуры голосования [11].

Для дискретного пространства, линия может быть определена уравнением: $r = x \cos \theta + y \sin \theta$, где r – расстояние от начала координат до линии; θ – угол между осью абсцисс и перпендикуляром к линии; x , y – координаты точек на изображении.

В дискретном преобразовании Хафа, угол θ и расстояние r дискретизируются (θ обычно изменяется от 0 до 180 градусов с некоторым шагом, а r изменяется в пределах возможных расстояний на изображении).

Дискретное преобразование Хафа для каждой точки (x, y) с интенсивностью больше заданного порога в дискретном изображении приводит к инкременту значений в аккумуляторе $H(r, \theta)$ для каждого θ и соответствующего r , вычисленного по формуле выше. Если представить это в виде формулы, то для каждой точки (x, y) и для каждого угла θ , обновляется аккумулятор следующим образом: $H(r\theta, \theta) += 1$, где $r\theta = x \cos \theta + y \sin \theta$ – это расчетное значение для каждой комбинации (x, y) и θ , и $H(r\theta, \theta)$ – значение в аккумуляторе для данного r и θ .

После прохода всех точек изображения и всех уг-

лов, аккумулятор $H(r, \theta)$ будет содержать информацию о всех линиях, которые могут быть присутствовать на изображении. Линии на изображении соответствуют пикам в аккумуляторном массиве H .

Преобразование Радона – используется для представления изображений в радиальном пространстве координат, что помогает выделить наиболее значимые особенности подписи. При аутентификации подписи, преобразование Радона может быть использовано для извлечения уникальных характеристик из образцов подписей, которые затем могут быть применены для сравнения и верификации [12].

Дискретное преобразование Радона используется для получения проекций изображения под разными углами. Сначала изображение разбивается на пиксели, затем для каждого угла θ и каждой «прямой» (в дискретном смысле, это последовательность пикселей, соответствующих этой прямой на сетке изображения), вычисляется сумма значений пикселей, через которые проходит прямая. Эти суммы формируют дискретную синопамму, аналогичную получаемой в результате непрерывного преобразования Радона.

Предположим, у нас есть двумерное изображение, представленное в виде дискретной матрицы пикселей $f[i, j]$, где i и j – это координаты пикселя в дискретных единицах. Тогда дискретное преобразование Радона $R(\theta, s)$ на этом изображении можно определить как:

$$R(\theta, s) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f[i, j] \cdot \delta(s - (i \cos \theta + j \sin \theta)),$$

где: N и M – размеры изображения по вертикали и горизонтали соответственно, θ – угол проекции, для которого вычисляется преобразование (обычно θ варьируется от 0 до 180 градусов) для полного сканирования изображения, s – расстояние от центра изображения до проекционной линии (s обычно варьируется в пределах, зависящих от размеров изображения), $\delta(x)$ – дискретный аналог дельта-функции, который в идеале равен 1, когда x равно 0, и 0 в остальных случаях. В реальности, для дискретных изображений, это условие адаптируется для учета пикселей, лежащих на или близко к идеальной линии, определенной через s и θ .

Обычно из-за ограниченной разрешающей способности изображения и пиксельной структуры, вместо идеальной дельта-функции используются различные методы интерполяции для определения вклада каждого пикселя в соответствующую проекцию.

Дискретное преобразование Радона обычно реализуется с использованием алгоритмов численного вычисления, которые аппроксимируют непрерывные интегралы, и может быть визуализировано в форме синопаммы, где каждая строка соответствует проекции при определенном угле.

Преобразование Радона позволяет выделить уникальные характеристики подписи, адаптироваться к естественным вариациям в подписях одного и того же человека, улучшая точность аутентификации и повышая сложность подделки характеристик под-

писи.

К недостаткам преобразования Радона можно отнести вычислительную сложность, низкую точность при плохом качестве изображений подписей, необходимость тщательного обучения и настройки системы для достижения высокой точности аутентификации. Метод может быть неэффективен для определенных стилей или условий подписи.

Комбинация преобразований Фурье, Хафа и Радона позволяет собрать более полную картину характеристик подписи, объединяя частотные характеристики (Фурье), структурные особенности (Хаф) и уникальные геометрические атрибуты (Радона). За счет комплексного анализа различных аспектов подписи повышается точность аутентификации, повышается устойчивость к различным методам подделки.

Однако следует учитывать, что совместное использование этих преобразований увеличивает вычислительную нагрузку, требует тщательной настройки и обучения модели для определения оптимальных параметров для каждого преобразования и их комбинации.

Метод опорных векторов (SVM). Метод *SVM* является методом анализа и классификации изображений на основе машинного обучения и может классифицировать образцы изображений с высокой точностью, управляя данными большой размерности.

Основная идея *SVM* заключается в поиске гиперплоскости в пространстве признаков, которая лучше всего разделяет точки данных разных классов. При этом *SVM* стремится максимизировать расстояние между этой гиперплоскостью и ближайшими точками каждого класса [13,14].

Математическая задача классификации заключается в следующем: пусть X – это пространство объектов (например, множество всех возможных изображений), Y – множество классов (например, $Y = \{-1, 1\}$). Пусть имеется обучающая выборка $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, где каждый x_i представляет собой объект, а y_i – его метка класса ($y_i = -1$ или $y_i = 1$). Задача состоит в том, чтобы построить функцию $f: X \rightarrow Y$ (классификатор), которая может присваивать класс y произвольному объекту x .

Цель *SVM* состоит в том, чтобы найти оптимальную гиперплоскость $f(x) = w^T x + b = 0$, которая разделяет два класса таким образом, чтобы минимизировать ошибку классификации и максимизировать «зазор» (расстояние от ближайших точек до гиперплоскости) [15-17]. Формально, задачу оптимизации *SVM* можно записать следующим образом:

$$\min_{w, b} \frac{1}{2} \|w\|^2.$$

При условии $y_i(w^T x_i + b) \geq 1$ для всех $i = 1, 2, \dots, n$.

Здесь $\|w\|$ – норма вектора весов w , а b – смещение (*bias*). Условие $y_i(w^T x_i + b)$ гарантирует, что все точки данных будут правильно классифицированы и что зазор будет максимальным.

Решение этой задачи оптимизации позволяет найти оптимальные значения w и b , что в свою очередь определяет положение оптимальной разделяющей гиперплоскости.

После того как оптимальная гиперплоскость найдена, класс нового объекта x определяется знаком функции $f(x)=w^T x_i + b$. Если $f(x)>0$, то объект относится к одному классу, если $f(x)<0$, то к другому.

С использованием *SVM*, подписи классифицируются как подлинные или поддельные. Этот подход обеспечивает надежный способ аутентификации подписей на основе динамических и уникальных свойств индивидуальных подписей [18-22].

Результаты. Для апробации программы аутентификации подписей были подготовлены данные для обучения *SVM* (5 эталонных подписей и 5 ложных подписей). Такой небольшой объём обучающей выборки обусловлен спецификой зада-

чи: ограниченным доступом к высококачественным образцам подписей и предварительным характером исследования, направленным прежде всего на проверку применимости выбранных методов обработки и классификации. При этом метод опорных векторов проявляет высокую устойчивость к небольшим выборкам при условии тщательного выделения информативных признаков. В дальнейшем планируется расширение набора обучающих данных для более полной валидации и повышения обобщающей способности модели. Для проверки работы обученного классификатора использованы 22 подписи.

Диаграмма активности работы программы показана на рисунке 1. Процесс распознавания подписей на основе машинного обучения начинается с загрузки файлов с эталонными и ложными подписями.

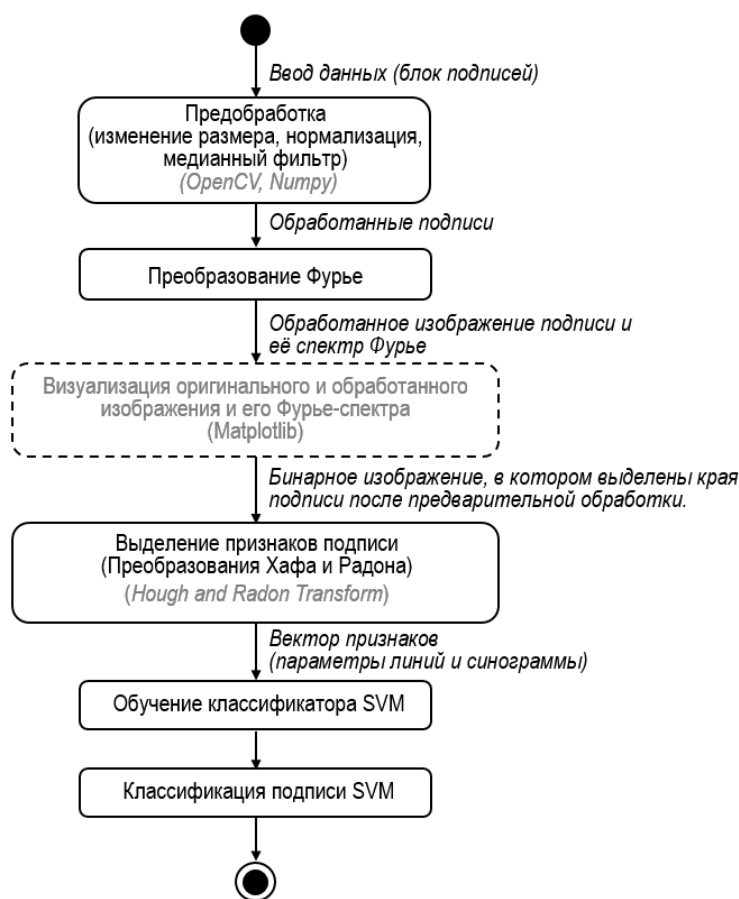


Рисунок 1 – Диаграмма активности

Для каждого загруженного файла изображения выполняется следующая последовательность действий: предварительная обработка изображения (применение медианного фильтра для снижения шума и изменение размера для стандартизации), визуализация оригинального изображения, обработанного изображения и его Фурье-спектра.

Результаты визуализации обработанных подписей показаны на рисунке 2. На диаграмме активности визуализация подписей показана пунктиром, так как

впоследствии, после отладки программы этот этап исключается.

В соответствии с этапами, показанными на рисунке 1, используется следующая модель:

– Сырой образец подписи – атрибуты: координаты пера x_i , y_i и давление пера p_i , зафиксированные во времени t_i .

– Предобработанный образец подписи – результат применения медианного фильтра, нормализации масштаба и сглаживания траекторий (очищенные

координаты, устранённый шум).

– Частотные признаки – амплитудные и фазовые коэффициенты первых k гармоник дискретного преобразования Фурье.

– Бинаризация краёв – бинарное изображение контура подписи, полученное пороговой фильтрацией.

– Признаки преобразования Хафа – число обнаруженных прямых линий, средний угол наклона и средняя длина линий.

– Признаки преобразования Радона – значения синопаммы при углах 0° , 45° , 90° и 135° и их статистические характеристики (среднее, дисперсия).

– Вектор признаков – объединённый вектор, формируемый конкатенацией всех численных пара-

метров из частотных и геометрических признаков.

– SVM -модель – параметры ядра, вектор весов w и смещение b , полученные в ходе обучения на векторах признаков для последующей классификации.

Поток данных между этапами:

– Сырой образец подписи → Предобработанный образец подписи.

– Предобработанный образец подписи → Частотные признаки.

– Предобработанный образец подписи → Бинаризация краёв → Признаки Хафа и Признаки Радона.

– Частотные и геометрические признаки → Вектор признаков.

– Вектор признаков → SVM -модель.

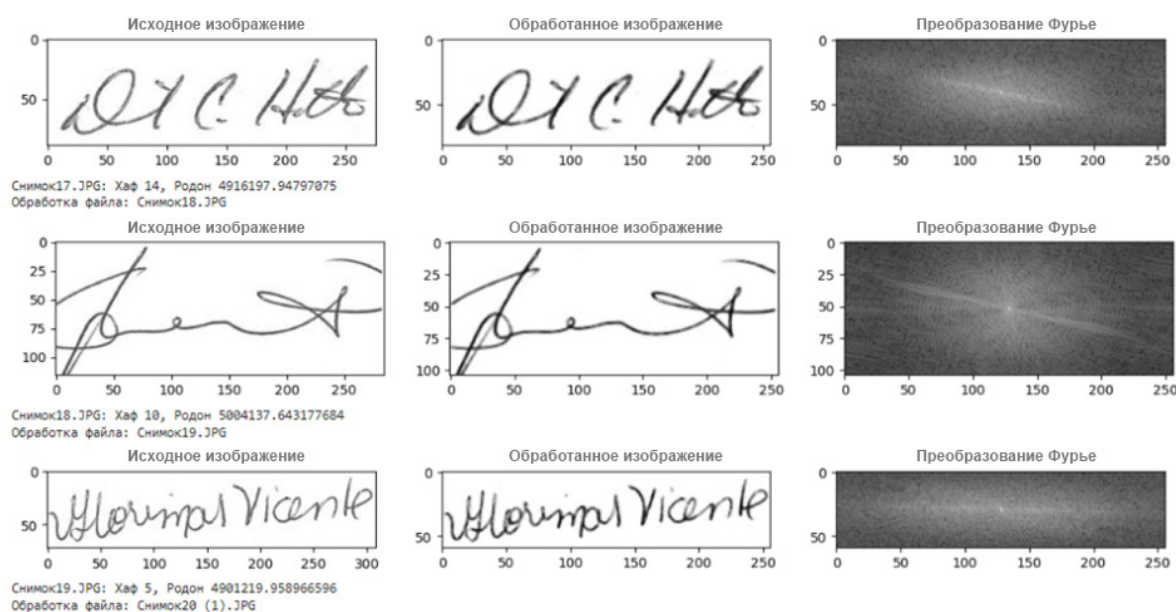


Рисунок 2 – Результаты визуализации обработанных подписей

После этапа предварительной обработки изображений осуществляется извлечение признаков, ключевым этапом которого является применение преобразований Хафа и Радона. Эти методы позволяют выделить параметры линий и синопаммы подписи, что играет важную роль в дальнейшем анализе. Обработанные изображения подписей разделяются на две группы: эталонные подписи (класс 0) и поддельные подписи (класс 1).

На следующем этапе загружаются проверочные образцы подписей, которые проходят аналогичную процедуру обработки и извлечения признаков. Полученные данные используются для обучения модели классификации, основанной на методе опорных векторов (SVM). В процессе обучения классификатор формирует границы разделения между подлинными и поддельными подписями, ориентируясь на выявленные характеристики. После обучения, полученная модель, используется для определения принадлежности полученных подписей к одному из классов.

Обсуждение. В ходе исследования был проведён

сравнительный анализ ключевых методов обработки изображений, их преимуществ и ограничений в контексте верификации подписей, что послужило основой для создания гибридного программного инструмента. Он сочетает несколько алгоритмов – от фильтрации в частотной области до методов пространственного анализа и выделения границ – и обеспечивает многоуровневое извлечение признаков с адаптацией параметров под индивидуальные особенности каждой подписи.

Экспериментальная проверка показала высокую эффективность предложенного подхода: для каждого проверяемого образца система выполняет предобработку, извлечение ключевых характеристик и сравнение полученного вектора признаков с эталонным, после чего выдаёт заключение о соответствии или несоответствии подписи образцу. Результаты тестирования подтверждают, что предложенный метод обладает высокой достоверностью: точность классификации составила не менее 98%. Для более детальной характеристики качества работы системы были рассчитаны ошибки первого и второго рода.

Общая доля неверных классификаций не превышает 2%, что представляет собой сумму значений *FAR* и *FRR*. При этом доля ложных принятия поддельных подписей и доля ложных отказов подлинных подписей не превышают 2%. Полученные результаты свидетельствуют о высокой надёжности предлагаемого метода, однако ввиду ограниченного объёма тестовой выборки эти показатели требуют дальнейшей проверки на более расширенном наборе данных.

Выводы. В результате проведенного исследования разработан комплексный подход к верификации подписей, включающий предварительную обработку с использованием преобразования Фурье, анализ геометрических характеристик посредством преобразований Хафа и Радона, а также классификацию с применением метода опорных векторов. Такой подход обеспечивает надёжную идентификацию подписей и демонстрирует высокую точность аутентификации.

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования комбинированных методов при решении задач распознавания подписей. Высокая точность модели свидетельствует о ее потенциале для применения в биометрических системах аутентификации и автоматизированных системах обработки документов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию предложенного метода к задачам, связанным с анализом рукописного ввода и других видов биометрической идентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. L.G. Hafemann, R. Sabourin & L.S. Oliveira. (2016). Off-line handwritten signature verification-Literature review. International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – 1-6. – DOI: 10.1109/ICPR.2017.8310112.
2. Иванов А.И. Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений. – Пенза: ПГУ, 2000. – 188 с.
3. Y. Okawa. (2018). Online signature verification using single-template matching with time-series averaging and gradient boosting. Pattern Recognition. – 79. – 97-109. – DOI: 10.1016/j.patcog.2020.107227.
4. Дорошенко Т.Ю., Костюченко Е.Ю. Система аутентификации на основе динамики рукописной подписи // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 2(32). – С. 219-223. – EDN SEBGXR.
5. Ismail, Ismail & Ramadan, Mohamed & El Danaf, Talaat & Samak, Ahmed. (2011). An efficient offline signature identification method based on Fourier Descriptor and chain codes. Int. J. of Biomedical Engineering and Technology. 5. 1 – 10. 10.1504/IJBET.2011.038469.
6. Anisimova, Ellina. (2014). On-line signature identification using a short-time Fourier transform and the radial basis. Computer Research and Modeling. 6. – 357-364. 10.20537/2076-7633-2014-6-3-357-364.
7. Абдалла Али Ахмед Абдельрахман, Жирков Владислав Федорович. Оффлайн проверка подписи с использованием Radon Transform и классификаторов svm/knn // Вестник ТГТУ. – 2009. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/off-line-signature-verification-using-radon-transform-and-svm-knn-classifiers> (дата обращения: 28.02.2025).
8. Гороховатский А.В. Верификация подписи на основе инвариантов преобразования Радона // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-podpisi-na-osnove-invariantov-preobrazovaniya-radona> (дата обращения: 28.02.2025).
9. T. Kaewkongka, K. Chamnongthai and B. Thipakorn, "Off-line signature recognition using parameterized Hough transform," ISSPA '99. Proceedings of the Fifth International Symposium on Signal Processing and its Applications (IEEE Cat. No.99EX359), Brisbane, QLD, Australia, 1999, pp. 451-454 vol.1, doi: 10.1109/ISSPA.1999.818209.
10. Lee, S. & Kim, J. (2017). A Novel Approach to Signature Authentication Using Fourier Transform and SVM. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 12. – 1945–1954. – DOI: 10.4236/ijcns.2009.25040.
11. Salehuddin, Fauziyah & Azlina, O. & Mardiana, B. & Manap, Zahariah & Haroon, Hazura. (2009). Signature Verification System using Support Vector Machine. – 1-4. 10.1109/ISMA.2009.5164825.
12. Николаев Д.П. Об определении преобразования Хафа как дискретного приближения преобразования Радона, Информационные процессы. – Т. 23. – № 2. – 2023. – С. 274-288. URL: <http://www.jip.ru/2023/274-288-2023.pdf> (дата обращения 03.03.2025).
13. Запругаев Сергей Александрович, Сорокин Андрей Игоревич. Распознавание простых линий на изображении // Прикладная информатика. – 2009. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspoznavanie-prostyh-linij-na-izobrazhenii> (дата обращения: 03.03.2025).
14. Макарова А.И., Сулимова В.В. Сравнительный анализ реализаций метода опорных векторов для обучения двухклассовому распознаванию в условиях большого числа объектов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – №10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-realizatsiy-metoda-opornykh-vektorov-dlya-obucheniya-dvuklassovomu-raspoznavaniyu-v-usloviyah-bolshogo-chisla> (дата обращения: 03.03.2025).
15. V. Nguyen, M. Blumenstein & G. Leedham. (2017). Global features for the off-line signature verification problem. International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). – 1-6. – DOI: 10.1109/ICDAR.2009.123.
16. Вдовкина С.А., Шибанов С.В. Библиотека для онлайн-верификации рукописной подписи // Вестник Пензенского государственного университета. – 2022. – № 2. – С. 76-84.
17. A. Sharma & S. Sundaram. (2017). A novel online signature verification system based on dynamic time warping and genetic algorithm. Pattern Recognition Letters. – 94. – 112-119. – DOI: 10.1109/TIFS.2016.263206.
18. W. Yassen A. AlKarem & E. Khalid. (2024). Handwritten signature verification using the convolutional neural network. International Journal of Document Analysis and Recognition (IJ-DAR). – 22(1). – 1-12. – DOI:10.37917/ijee.20.2.7.
19. G.S. Eskander, R. Sabourin & E. Granger. (2017). Hybrid writer-independent–writer-dependent offline signature verification system. IET Biometrics. – 6(3). – 169-177. – DOI:10.1049/iet-bmt.2013.0024.
20. L. Batista, E. Granger & R. Sabourin. (2016). Dynamic selection of generative–discriminative ensembles for off-line signature verification. Pattern Recognition. – 52. – 182-197. – DOI:10.1016/j.patcog.2011.10.011.
21. J.F. Vargas, M.A. Ferrer, C.M. Travieso & J.B. Alonso. (2017). Off-line handwritten signature GPDS-960 corpus. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 12(3). – P. 596-605. –DOI:10.1109/ICDAR.2007.4377018.
22. R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez & J. Ortega-Garcia. (2020). DeepSign: Deep learning for signature analysis. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 15(1). – P. 229-240. – DOI:10.1109/TBIOM.2021.3054533.

Статья поступила в редакцию 16.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.032.2
EDN: TVDCAC

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ С НАСТРОЙКОЙ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 2852-2633
AuthorID: 185018
ORCID: 0000-0003-3313-2731

ГРОМОВ Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
директор института автоматизации и информационных технологий
Тамбовский государственный технический университет
(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: gromov@yandex.ru)

SPIN: 5033-6943
AuthorID: 865469
ORCID: 0009-0009-3628-6980

КАРАСЕВ Павел Игоревич, кандидат технических наук,
доцент кафедры КБ-1 «Защита информации»
МИРЭА - Российский технологический университет
(107076, Россия, Москва, улица Стромынка, 20, e-mail: karasev@mirea.ru)

АЛЬ-СУДАНИ Зайд Али Хуссейн, аспирант института автоматизации и информационных технологий
Тамбовский государственный технический университет
(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: alsoudanizaidalin@mail.ru)

ШАМСУЛДИН Хайдар Абдулваххаб Х., аспирант института
автоматизации и информационных технологий
Тамбовский государственный технический университет
(392024, Россия, Тамбов, улица Советская, 116, e-mail: shamsuldaeenhaidar@mail.ru)

Аннотация. В данной статье рассматривается совмещенный гибридный метод автоматического формирования нечетких правил на основе исходных обучающих данных. Предлагаемый подход включает два ключевых этапа: на первом этапе генетический алгоритм генерирует начальный набор нечетких правил, оптимизируя их структуру и минимизируя избыточность, а на втором этапе выполняется точная настройка параметров функций принадлежности с помощью градиентного метода, что позволяет повысить точность модели. В качестве теоретической основы используется приближение логики Лукашевича, обеспечивающее гибкое описание как нечетких связей, так и функций принадлежности. Этот выбор обусловлен его преимуществами в обработке неопределенности и возможностью эффективной аппроксимации сложных нелинейных зависимостей. В работе представлены результаты численных экспериментов, демонстрирующие высокую точность и устойчивость предложенного метода по сравнению с классическими подходами. Применение гибридной стратегии позволяет сократить вычислительные затраты при сохранении интерпретируемости правил, что делает метод перспективным для задач управления, прогнозирования и анализа данных в условиях неполной информации.

Ключевые слова: генетический алгоритм, нечеткие правила, логика Лукашевича, функция принадлежности, градиент.

A GRADIENT-BASED GENETIC ALGORITHM FOR CONSTRUCTING FUZZY RULES

© The Author(s) 2025

GROMOV Yuri Yuryevich, doctor of technical sciences,
director of the Institute of Automation and Information Security
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya Street, Tambov, 392024, Russia, e-mail: gromovtambov@yandex.ru)

KARASEV Pavel Igorevich, candidate of technical sciences, associate professor,
lecturer of the KB-1 "Information Protection" Department
MIREA - Russian Technological University
(20 Stromynka Street, Moscow, 107076, Russia, e-mail: karasev@mirea.ru)

AL-SOUDANY Zaid Ali Hussein, graduate student
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya Street, Tambov, 392024, Russia, e-mail: alsoudanizaidalin@mail.ru)

SHAMSULDAEEN Haidar Abdulwahhab H., graduate student
Tambov State Technical University
(116 Sovetskaya Street, Tambov, 392024, Russia, e-mail: shamsuldaeenhaidar@mail.ru)

Abstract. This paper discusses a combined hybrid method for the automatic generation of fuzzy rules based on initial training data. The proposed approach includes two key stages: at the first stage, the genetic algorithm generates

an initial set of fuzzy rules, optimizing their structure and minimizing redundancy, and at the second stage, fine-tuning of the membership function parameters is performed using the gradient method, which improves the accuracy of the model. The theoretical basis is the Lukashevich logic approximation, which provides a flexible description of both fuzzy connections and membership functions. This choice is due to its advantages in handling uncertainty and the ability to effectively approximate complex nonlinear dependencies. The paper presents the results of numerical experiments demonstrating the high accuracy and stability of the proposed method compared to classical approaches. The use of a hybrid strategy allows reducing computational costs while maintaining the interpretability of rules, which makes the method promising for control, forecasting and data analysis problems under conditions of incomplete information.

Keywords: genetic algorithm, fuzzy rules, Lukashevich logic, membership function, gradient.

Для цитирования: Громов Ю.Ю. Генетический алгоритм с настройкой на основе градиента для построения нечетких правил / Ю.Ю. Громов, П.И. Карасев, З.А.Х. Аль-Судани, Х.А.Х. Шамсулдин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 77-83. – EDN: TVDCAC.

Введение. В наши дни нейронные сети часто используют для сопоставления входов и выходов, демонстрируя надежные возможности обучения. Однако интерпретируемость нейронных сетей остается ограниченной, поскольку в них отсутствуют явные механизмы логического рассуждения. Обоснование выходов, генерируемых обученной сетью [9-11], зачастую непрозрачно, поскольку знания, заложенные в сети, распределены по ее весам и структурной конфигурации, что затрудняет их преобразование в простые логические формулировки. Задача выведения логических правил для описания набора взаимосвязей между входом и выходом или для пояснения внутреннего поведения системы «черного ящика» продолжает оставаться важной областью исследований в области вычислительного интеллекта [1, 12].

В данном исследовании мы представляем метод построения кратких и интерпретируемых нечетких правил [2, 14] на основе обучающих данных. Работа построена следующим образом: В разделе 2 дается формальная постановка задачи и описывается предлагаемая методология решения. В разделе 3 вводится понятие функции сжатия, которая играет центральную роль в последующем развитии, и рассматриваются ее основные свойства. В разделах 4 и 5 подробно описана предлагаемая методология построения нечетких правил. Наконец, в разделе 6 представлено практическое применение метода, иллюстрирующее его эффективность.

Методология. Основной целью исследования является разработка некоторой системы, которая генерирует нечеткие правила, задающие описание исходному набору обучающих данных. Обучающие данные представляют собой набор точек x_j (где $j=1 \dots nData$), расположенных в пространстве размерности n . Каждой точке данных присваивается целевой класс c_j (где $j=1 \dots nClass$). Все используемые в расчете значения могут быть нормализованы к интервалу $[0,1]$, поэтому исходный диапазон не является ограничивающим. При этом метки целевых классов в обязательном порядке должны быть преобразованы в бинарные векторы.

Главными свойствами создаваемых правил являются их интерпретируемость и точность. Ин-

терпретируемость определяется размером набора правил и количеством условий (антецедентов) в каждом правиле.

Точность набора правил оценивается по его способности корректно классифицировать новые, ранее не встречавшиеся примеры. Для предотвращения избыточной сложности логических конструкций в структуру правил введены следующие ограничения:

1. Правила формулируются исключительно в виде дизъюнкций конъюнкций, то есть представляются в дизъюнктивной нормальной форме (DNF).

2. Логическая структура правил формируется с использованием генетического алгоритма, что позволяет автоматически находить оптимальные комбинации условий.

3. Для уточнения параметров функций принадлежности применяется градиентная оптимизация, обеспечивающая локальную настройку системы.

С учетом некоторого приближения можно заметить, что вышеописанный подход схож со структурой радиальных базисных сетей, в которой каждая конъюнкция определяет область в пространстве признаков, в то время как на самом верхнем уровне эти области объединяются.

На третьей стадии проектирования алгоритма генерации продукционных правил критически важным условием является обеспечение дифференцируемости математических моделей как функций принадлежности нечетких множеств [3], так и операторов агрегации лингвистических термов.

Данное требование обусловлено необходимостью интеграции аппарата градиентного спуска в процедуру адаптивной настройки параметрических коэффициентов системы, где непрерывность первых производных целевой функции по всем оптимизируемым переменным выступает необходимым условием сходимости итерационных методов оптимизации.

Однако традиционные операторы Лукашевича и широко применяемые трапециевидные функции принадлежности не удовлетворяют этому условию. В связи с этим, перед описанием алгоритма необходимо выполнить их аппроксимацию, обеспечивающую выполнение данного требования.

Функция раздавливания. Класс нечетких операторов Лукашевича (см., например, работы Фодора и Рубенса, Клемента и др., Аккермана, Чиньоли и др.) чаще всего применяется для разных задач.

В рамках данного семейства широко известных операторов ключевую роль играет функция *cut*, обозначаемая квадратными скобками $[\cdot]$. Данная функция может быть определена через переменную x путем последовательного применения операций максимума и минимума: сначала вычисляется максимум между 0 и x , после чего результат ограничивается сверху значением 1.

Функция *cut* задается следующим образом:

$$[x] = \min\left(\max(0, x), 1\right) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 0 \\ x, & \text{если } 0 < x < 1 \\ 1, & \text{если } 1 \leq x \end{cases} \quad (1)$$

и пусть обобщенная функция отсечения равна:

$$[x]_{a,\lambda} = \left[\lambda(x - a) + \frac{1}{2} \right] = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a - \frac{1}{2\lambda} \\ 1, & \text{если } a + \frac{1}{2\lambda} \leq x \\ \frac{x-a}{\lambda} + \frac{1}{2} & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

где $a \in R$ – его центр, $\lambda \in R^+$ – касательная к его наклону. Связки Лукашевича могут быть построены с использованием функции *cut*. Формулы конъюнкции, дизъюнкции, импликации и отрицания следующие.

Связки Лукашевича – это

$$c(x, y) = [x + y - I] \quad (3)$$

$$d(x, y) = [x + y] \quad (4)$$

$$i(x, y) = [1 - x + y] \quad (5)$$

$$n(x, y) = 1 - x \quad (6)$$

где $x, y \in [0, 1]$.

Расширить приведенные выше выражения на n входных значений несложно, поскольку они ассоциативны. n -арными формулами конъюнкции и дизъюнкции являются:

$$c(x_1, x_2, \dots, x_n) = [\sum_{i=1}^n x_i - (n - 1)] \quad (7)$$

$$d(x_1, x_2, \dots, x_n) = [\sum_{i=1}^n x_i] \quad (8)$$

Как видно из приведенных выше формул, они имеют общий вид

$$o(x_1, x_2, \dots, x_n) = [\sum_{i=1}^n x_i - A], \quad (9)$$

где тип оператора определяется только параметром A . Если $A = n - 1$, то оператор является конъюнктивным, а если $A = 0$, то оператор является дизъюнктивным. Тот факт, что тип определяется только значением одного параметра, является полезным свойством этого семейства операторов.

Треугольные и трапециевидные функции принадлежности широко применяются в задачах нечеткого управления и моделирования благодаря их простоте и удобству в использовании.

Для описания этих кусочно-линейных функций принадлежности может быть использована обобщенная функция отсечения (*cut function*). Это позволяет установить аналогию между логическими связками и функциями принадлежности, поскольку обе они могут быть выражены через обобщенную функцию отсечения.

В частности, трапециевидная функция принадлежности может быть сконструирована как комбинация двух обобщенных функций отсечения, что

обеспечивает ее математическое представление в виде:

$$c([x]_{a_1, \lambda_1}, [x]_{a_2, \lambda_2}) = [[x]_{a_1, \lambda_1} + 1 - [x]_{a_2, \lambda_2} - 1] = [[x]_{a_1, \lambda_1} - [x]_{a_2, \lambda_2}], \quad (10)$$

где $a_1, a_2, \lambda_1, \lambda_2$ являются действительными числами и $a_1 + 1/(2\lambda_1) < a_2 + 1/(2\lambda_2)$. В качестве частного случая, путем простого вычисления, если $a_2 - a_1 = 1/(2\lambda_1) + 1/(2\lambda_2)$, то мы получаем треугольную функцию принадлежности, ядро которой содержит ровно один элемент $a_1 + 1/(2\lambda_1)$.

Ранее мы предложили аппроксимацию обобщенной функции сжатия в работе Домби и Гера, где мы более подробно исследовали свойства функции сжатия. Определение функции сжатия заключается в следующем:

Функция сжатия – это

$$S_{a,\lambda}^\beta(x) = \ln \left(\frac{\sigma_{a+\frac{1}{2\lambda}}^{(-\beta)}(x)}{\sigma_{a-\frac{1}{2\lambda}}^{(-\beta)}(x)} \right)^{\lambda/\beta} = \ln \left(\frac{1 + e^{\beta(x - a + \frac{1}{2\lambda})}}{1 + e^{\beta(x - a - \frac{1}{2\lambda})}} \right)^{\lambda/\beta}, \quad (11)$$

где $x, a, \lambda, \beta \in R$ и $\sigma_d^{(\beta)}(x)$ обозначает сигмовидную функцию $(1 + e^{-\beta(x-d)})^{-1}$.

Производные функции сжатия являются простыми и могут быть представлены с помощью сигмовидных функций, а также самой функции сжатия:

$$\frac{\partial S_{a,\lambda}^{(\beta)}(x)}{\partial x} = \lambda \left(\sigma_{a+\frac{1}{2\lambda}}^{(-\beta)}(x) - \sigma_{a-\frac{1}{2\lambda}}^{(-\beta)}(x) \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial S_{a,\lambda}^{(\beta)}(x)}{\partial a} = \lambda \left(\sigma_{a+\frac{1}{2\lambda}}^{(\beta)}(x) - \sigma_{a-\frac{1}{2\lambda}}^{(\beta)}(x) \right) \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_{a,\lambda}^{(\beta)}(x)}{\partial \lambda} = \frac{1}{\lambda} S_{a,\lambda}^{(\beta)}(x) - \frac{\left(\sigma_{a+\frac{1}{2\lambda}}^{(\beta)}(x) + \sigma_{a-\frac{1}{2\lambda}}^{(\beta)}(x) \right)}{2\lambda} \quad (14)$$

Используя функцию сжатия, можно аппроксимировать операторы Лукашевича, заменив функцию сокращения на функцию сжатия.

Мягкие трапециевидные и треугольные функции принадлежности могут быть построены путем применения приближенного оператора конъюнкции к двум функциям сжатия. Таким образом, как функции принадлежности, так и связи Лукашевича могут быть аппроксимированы функцией сжатия. Аналогично жестким трапециям, для описания функции принадлежности мягкой трапеции необходимы четыре параметра, а именно a_1, λ_1 и a_2, λ_2 , где a_1 и λ_1 задают центр и касательную ее левого наклона, а a_2 и λ_2 задают центр и касательную ее правого наклона. Соответственно, чтобы гарантировать формирование треугольной или трапециевидной форм, оба параметра β , управляющие сжимающими функциями, должны иметь противоположные знаки.

Введем компактное обозначение, которое является частью создаваемой структуры – гибкая логика (*pliant logic*).

Пусть гибким обозначением мягкой трапециевидной функции принадлежности будет выражение:

$$\langle a_1 < \lambda_1 x < \lambda_2 a_2 \rangle \beta \quad (15)$$

для конечного β , и

$$[a_1 < \lambda_1 x < \lambda_2 a_2] \quad (16)$$

для $\beta = \infty$.

Таким образом, аппроксимация функции принадлежности трапеции выглядит следующим образом

$$\mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x) = S_{1/2, 1}^{(\beta)}(S_{a_1, \lambda_1}^{(\beta)}(x) + S_{a_2, \lambda_2}^{(-\beta)}(x) - 1) \quad (17)$$

Производные мягкой трапеции можно легко вычислить, используя цепное правило. Обозначим

$$y = S_{a_1, \lambda_1}^{(\beta)}(x) + S_{a_2, \lambda_2}^{(-\beta)}(x) - 1, \quad (18)$$

$$D_+^{(\beta)}(x, u, v) = \sigma_{u + \frac{1}{2v}}^{(\beta)}(x) + \sigma_{u - \frac{1}{2v}}^{(\beta)}(x) \quad (19)$$

$$D_-^{(\beta)}(x, u, v) = \sigma_{u + \frac{1}{2v}}^{(\beta)}(x) - \sigma_{u - \frac{1}{2v}}^{(\beta)}(x) \quad (20)$$

тогда

$$\frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial a_1} = \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial a_1} = \lambda_1 \cdot D_-^{(-\beta)}(y, \frac{1}{2}, 1) \cdot D_-^{(\beta)}(x, a_1, \lambda_1) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial \lambda_1} &= \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \lambda_1} = \lambda_1 \cdot D_-^{(-\beta)}(y, \frac{1}{2}, 1) \cdot (S_{a_1, \lambda_1}^{(\beta)}(x) - \frac{1}{2} D_+^{(\beta)}(x, a_1, \lambda_1)) \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial a_2} = \\ &= \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial a_2} = \lambda_2 \cdot D_-^{(-\beta)}(y, \frac{1}{2}, 1) \cdot D_-^{(-\beta)}(x, a_2, \lambda_2) \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial \lambda_2} = \frac{\partial \mu_{a_1, a_2}^{\lambda_1, \lambda_2}(x)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \lambda_2} = \\ &= \frac{1}{\lambda_2} \cdot D_-^{(-\beta)}(y, \frac{1}{2}, 1) \cdot ((S_{a_1, \lambda_1}^{(-\beta)}(x) - \frac{1}{2} D_+^{(-\beta)}(x, a_2, \lambda_2)) \end{aligned} \quad (22)$$

Структура и представление правил. Начальным пунктом построения правил будут фаззификация и дискретизация обучающих исходных данных. Каждый входной интервал равномерно разделяется на k нечетких [4, 15] множеств, каждое из которых характеризуется трапециевидной или треугольной функцией принадлежности. Каждый элемент входного вектора подвергается размытию с использованием данных функций принадлежности, в результате чего n -мерные данные преобразуются в $k \cdot n$ нечетких значений принадлежности. В дальнейшем фаззифицированные значения будем обозначать как x_{ij} (где $i=1 \dots n$, $j=1 \dots k$).

Преимущество начальной фаззификации заключается в том, что в случае задачи классификации выходные данные также представляются в виде нечетких значений. Это позволяет получить более информативные результаты по сравнению с бинарными четкими ответами ("да" / "нет"), а также оценить степень уверенности (надежность) классификации.

В рамках предложенной формализации система продукционных правил инкапсулируется в структуру структурно-ограниченной искусственной нейронной [8, 17], характеризующейся следующими топологическими и параметрическими ограничениями:

Унификация активационных характеристик: Все нейронные элементы используют сигмоидальную активационную функцию с параметром насыщения $\lambda=1$, обеспечивающую нелинейное сжатие выходного сигнала в диапазон $[0, 1]$ при фиксированной крутизне переходной характеристики.

Бинарная квантизация связей: Синаптические веса подвергаются детерминированной бинаризации, принимая дискретные значения из множества $\{0, 1\}$, что реализует селективное подключение пресинаптических входов без адаптивной регуляции силы связи.

Структурная регуляция сложности: Архитектура сети следует однослойной топологии скрытого уров-

ня, при сохранении произвольной кардинальности нейронного ансамбля для обеспечения гибкости логических комбинаций.

Нейронные модули дифференцируются по типу реализуемой многозначной логической операции:

T -нормативные нейроны (конъюнкция Лукашевича) аппроксимируют оператор обобщенного логического умножения через супремум-архитектуру с детерминированным пороговым смещением, задаваемым как $b=n-l$, где n – мощность входного вектора.

S -нормативные нейроны (дизъюнкция Лукашевича) эмулируют ослабленную дизъюнктивную операцию посредством инфимум-ориентированной трансформации с нулевым смещением.

Критическим аспектом реализации является дифференцируемая параметризация логических операторов, когда оба типа нейронов используют гладкую аппроксимацию исходных недифференцируемых операторов Лукашевича через составные сигмоидальные преобразования, что обеспечивает непрерывность градиента для последующей оптимизации. Семантическая интерпретация нейрона однозначно детерминируется величиной его смещения – смещение $b=n-l$ индуцирует T -нормативное поведение (минимизация отклонений от полной конъюнктивной истинности), тогда как $b=0$ активирует S -нормативную логику (максимизация степени дизъюнктивной выполнимости).

Нейрон является дизъюнктивным, если его смещение равно нулю (рис. 1).

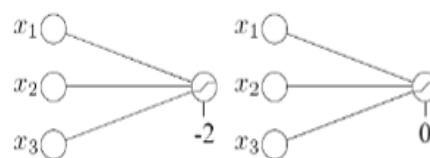


Рисунок 1 – Нейрон с различными значениями смещения (-2 и 0), что позволяет вычислять конъюнкцию и дизъюнкцию Лукашевича для трех входных сигналов

В рамках данной сети смещения остаются постоянными, однако при изменении структуры сети (например, при добавлении новых нейронов) смещения необходимо пересчитывать для сохранения типов нейронов. Дополнительное ограничение архитектуры сети заключается в возможности удаления скрытого слоя, что упрощает структуру без потери функциональности.

Наложённые ограничения на функцию активации, весовые коэффициенты и архитектуру сети обеспечивают ряд значительных преимуществ. Во-первых, логическая формула в рамках логики Лукашевича может быть непосредственно извлечена из структуры сети, что существенно повышает степень интерпретируемости модели. Во-вторых, такие ограничения значительно упрощают представление логических формул (см., например, [1], где рассматривается сложность извлечения формул из сетей с вещественными весовыми коэффициентами). Однако данные ограничения также влияют на форму поверхности принятия решений, приводя к тому, что границы решений становятся параллельными осям координат (рис. 2).

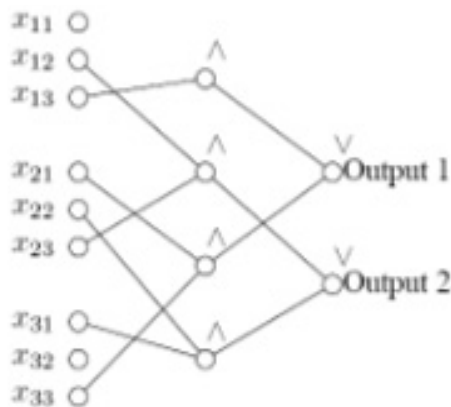


Рисунок 2 – Иллюстрация нейронной сети и-или

На примере типичной сети (рис. 2) значение $Output1$ может быть выражено как $x_{13} \vee (x_{21} \wedge x_{33})$. Как видно из иллюстрации, некоторые входные узлы могут оставаться неподключенными к скрытым нейронам, что исключает их влияние на выходные данные сети. перефразирую этот текст более научным языком как человек. Преимущество использования специальной функции активации в ограниченной сетевой структуре заключается в том, что параметр β напрямую влияет на гладкость поверхности принятия решений, не изменяя при этом фактические границы решений. Количество нечетких множеств [5], на которые делится каждый входной диапазон, может быть адаптивно изменено для достижения необходимой точности разрешения пространства признаков.

Результаты. Процесс оптимизации. Мы применяем подход, схожий с методами, предложенными Хуангом и Сином, для описания набора правил, однако процесс оптимизации в нашем случае имеет

существенные отличия. Ключевыми различиями являются использование фиксированных весов сети и градиентная настройка [6, 16, 20] параметров функций принадлежности. Предлагаемый гибридный метод обучения включает два последовательных этапа.

На первом этапе фиксируются нечеткие множества входных данных, после чего с помощью генетического алгоритма оптимизируются синаптические связи сети. Данная оптимизация позволяет получить набор правил, которые приближенно описывают поведение базовой системы, однако требуют дальнейшего уточнения.

На втором этапе применяется метод локальной оптимизации на основе градиента, который выполняет точную настройку параметров нечетких множеств [7, 13], повышая точность и адаптивность модели. Далее эти этапы будут рассмотрены более подробно.

Оптимизация правил с помощью GA. Сеть организована таким образом, что весовые коэффициенты могут принимать только два значения: 0 или 1. Это означает, что связь (синапс) между нейронами в последовательных слоях либо существует, либо отсутствует. На первом этапе выполняется оптимизация структуры сети с целью достижения наилучшего возможного результата. Структура сети может быть представлена в виде битовой последовательности, где каждый бит указывает на наличие или отсутствие связи между соответствующими нейронами.

Функция приспособленности генетического алгоритма [10] определяется как отрицательное значение суммы квадратов ошибок (SSE) между выходными данными сети и целевыми значениями:

$$F(x) = - \sum_{i=1}^n \|z_i - t_i\|^2 \quad (23)$$

где z обозначает фактический выходной сигнал сети, t – целевое значение выходного сигнала, а n – количество обучающих данных. По итогу в оптимизированную с помощью генетического алгоритма сеть будут входить исключительно синапсы, обеспечивающие аппроксимацию взаимосвязи между входными и выходными данными на основе исходных нечетких множеств. Конечная логическая структура является грубой, поскольку нечеткие множества, скорее всего, плохо подходят для решения задачи.

Оптимизация членства на основе градиента. Роль параметра β в процессе обучения является критически важной. Если значение β слишком мало, различия между различными нечеткими множествами в пределах одного входного интервала становятся несущественными. Если же значение β слишком велико (то есть сжимающая функция слишком точно аппроксимирует обобщенную функцию отсечения), эффективность градиентной оптимизации значительно снижается.

Создаваемый набор правил может быть извлечен из структуры такой сети после окончания любого

этапа оптимизации, причем прослеживается биективное соответствие между структурой сети и набором логических формул. Извлеченные правила представляют собой интерпретируемые нечеткие правила с явно выраженной степенью уверенности в результате, что является определяющим преимуществом данного метода.

Пример построения правила. В данном разделе представлен пример применения описанного выше метода построения правил. В качестве тестового набора данных используется набор *Wine*, предоставленный репозиторием машинного обучения *UCI*.

Набор данных *Wine* включает 178 экземпляров, каждый из которых представляет собой 13-мерный вещественнозначный вектор. Данные содержат три класса, соответствующих различным типам вин. Для обеспечения корректной обработки входные данные были предварительно нормализованы в интервале $[0,1]$. Следующий набор правил был изучен с использованием 3 нечетких множеств для каждого признака и 3 скрытых узлов в сети:

Wine 1: $[0.2 <_{10} x_5 <_{10} 0.7] \wedge [0.4 <_{6,9} x_7 <_{4,4} 0.9]$

Wine 2: $[x_{10} <_{5,6} 0.2]$

Wine 3: $[x_7 <_{5,1} 0.2]$

Эти правила дают точность 91,5% при 12 неправильно классифицированных и 3 неопределенных выборках. Обратите внимание, что в правилах используются только признаки x_7 и x_{10} . Средние коэффициенты достоверности по трем классам составили 94%, 83% и 97,6%.

Лучшей базы правил можно достичь, увеличив число скрытых нейронов на один:

Wine 1: $[0.3 <_{10} x_{13}] \wedge [0.4 <_{6,5} x_7 <_{4,7} 1]$

Wine 2: $[x_2 <_{5,8} 0.2] \wedge [x_5 <_{3,2} 0.3] \vee [x_{10} <_{10} 0.2]$

Wine 3: $[x_7 <_{5,1} 0.2]$

Как видно, класс *Wine 2* использует два скрытых нейрона. Эти несколько более сложные правила дают точность 97,1% при 3 ошибочно классифицированных и 2 неопределенных выборках, где средние коэффициенты достоверности для классов составляют 92%, 89,2% и 96,4%.

Обсуждение. Новизна предложенной модели заключается в том, что логическая информация извлекается напрямую, а оптимизация проводится на уровне функций принадлежности, а не весов сети. Это исключает необходимость округления весов до целых чисел, что предотвращает потерю информации и сохраняет точность модели. Полученные правила обладают высокой интерпретируемостью благодаря их представлению в дизъюнктивной нормальной форме (*DNF*), что обеспечивается специальной архитектурой сети. Таким образом, правила являются краткими и легко понятными, что делает модель удобной для практического применения.

Выводы. В данной статье предложен комбинированный метод оптимизации, объединяющий генетический алгоритм и градиентные методы, для построения нечетких логических правил.

Генетический алгоритм применяется для поиска оптимальных характеристик входных данных, обеспечивающих эффективное разделение классов. На втором этапе метода выполняется уточнение исходных нечетких функций принадлежности, что позволяет повысить точность модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Степанова, О.А. Основы искусственного интеллекта: кластерный анализ с использованием алгоритма нечетких с-средних / О.А. Степанова, Г.А. Диденко, С.Т. Касюк // Преподаватель года 2023: Сборник статей II Международного профессионально-методического конкурса. В 2-х частях, Петрозаводск, 13 декабря 2023 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства "Новая Наука", 2023. – С. 52-62. – EDN PDVFTF.
2. Сравнение нечетких методов обработки изображений / Ю.Ю. Громов, П.И. Карасев, М.Ю. Титов, Ф.А. Сари // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 7. – С. 55-61. – DOI 10.25791/pribor.7.2021.1279. – EDN WMKTPR.
3. Шляхова, Н.И. Метод построения функций принадлежности нечетких множеств на основе модификации метода попарных сравнений и прямого группового метода / Н.И. Шляхова // Актуальные проблемы современной науки: IV Международная научно-практическая конференция, Алушта, 27-30 апреля 2015 года. Том Выпуск 4, Том 2. – Алушта: Ставропольский университет, 2015. – С. 285-287. – EDN UECTDL.
4. Аль-Раммахи, А.А.Х. Кластеризация данных с использованием алгоритма Дзюбы (FDH) и нечетких С-средних: сравнительное исследование / А.А.Х. Аль-Раммахи, П.А. Трефилов // Инженерные технологии для устойчивого развития и интеграции науки, производства и образования: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Ассоциации "Объединённый университет имени В.И. Вернадского", Тамбов, 29-31 мая 2019 года. Том I. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2019. – С. 10-11. – EDN WXMJN.
5. Сари, Ф.А. Модификация нечетких С-средств для сегментации изображения документа / Ф.А. Сари, А.А. Аль-Раммахи // Цифровизация агропромышленного комплекса: Сборник научных статей II международной научно-практической конференции в 2-х томах, Тамбов, 21-23 октября 2020 года. Том II. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 406-412. – EDN VYCCSM.
6. Бассель, З. Применение метода опорных векторов и гистограмм направленных градиентов для классификации событий на изображениях / З. Бассель // Образование, наука, производство, Белгород, 20-22 октября 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 2652-2659. – EDN VNPITN.
7. Баранов, А.О. Синтез метода реальных опционов и метода нечетких множеств для оценки эффективности инновационных проектов: критический обзор / А.О. Баранов, Е.И. Музыко, В.Н. Павлов // Идеи и идеалы. – 2018. – Т. 2, № 1(35). – С. 190-209. – DOI 10.17212/2075-0862-2018-1.2-190-209. – EDN YWSIQS.
8. Боженко, П.П. Краткая характеристика нейронных сетей. Реализация расширяемой нейронной сети / П.П. Боженко, Р.У. Стативко // Вестник молодёжной науки России. – 2019. – № 5. – С. 1. – EDN SDFVWR.
9. Андриенко, М.П. Понимание повторяющихся нейронных сетей: предпочтительная нейронная сеть для данных временных рядов / М.П. Андриенко, П.А. Юдин, Е.Ю. Вишневецкая // Актуальные вопросы современной науки и образования: сборник статей Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Пенза, 05 января 2020 года. Том Часть 1. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 96-98. – EDN DXRRYY.
10. Бутмерчук, Е.Б. Методы и системы интеллек-

туального анализа данных, распознавания образа изображений и сигналов / Е.Б. Бутмерчук, А.Ю. Корендюк // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 8(38). – С. 128-132. – EDN CLNJEL.

11. Grigoryan, T.A. Automatic signal type recognition via neural network / T.A. Grigoryan // Вестник Российско-Армянского (Славянского) университета: физико-математические и естественные науки. – 2021. – No. 2. – P. 27-35. – EDN KIXTFU.

12. Бутмерчук, Е.Б. Методы и системы интеллектуального анализа данных, распознавания образа изображений и сигналов / Е.Б. Бутмерчук, А.Ю. Корендюк // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 8(38). – С. 128-132. – EDN CLNJEL.

13. Афонин, В.Л. Нейронная сеть на основе специальной потенциальной функции для распознавания многофункциональных сигналов / В.Л. Афонин, В.В. Слешов // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 9. – С. 478-483. – DOI 10.17587/it.27.478-483. – EDN NONWWW.

14. Уханов, Е.В. Статистические характеристики сигнала на выходе оптимальной радиолокационной системы распознавания подвижных воздушных объектов / Е.В. Уханов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 4. – С. 26-31. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-4-26-31. – EDN JBGXHA.

15. Мишунина, Н.О. Разработка системы идентификации объекта по его изображению / Н.О. Мишунина // Путь науки. – 2015. – № 5(15). – С. 39-41. – EDN TWHNMB.

16. Проблема идентификации пользователя компьютерной системы по трехмерным изображениям лица / Г.А. Фофанов, А.В. Еременко, М.А. Старков, А.Е. Сомотуга // Омский научный вестник. – 2017. – № 5(155). – С. 181-186. – EDN ZUQNNH.

17. Киселев, В.В. Сравнительный анализ моделей нейронных сетей применительно к задачам биометрической идентификации по изображениям ушей / В.В. Киселев, Н.С. Коннова // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 12-1. – С. 79-83. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_12_79. – EDN YRCHOR.

18. Комков, В.С. Метод сегментации растровых изображений на основе выбора оптимальных направлений обработки пикселей изображения / В.С. Комков, М.В. Дюдин // Математика и ее приложения в современной науке и практике: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Курск, 15-17 апреля 2015 года / Е.А. Бойцова (ответственный редактор). – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2015. – С. 139-145. – EDN UTXCPF.

19. Ларионов, С.Б. Алгоритм сегментации изображений с помощью нейронной сети без использования других изображений / С.Б. Ларионов // Математическое и компьютерное моделирование: Сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной памяти Р.Л. Долганова, Омск, 01 декабря 2017 года / Ответственный за выпуск И.П. Бесценный. – Омск: Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, 2017. – С. 174-176. – EDN YOKRAU.

20. Немировский, В.Б. Сегментация изображений с помощью рекуррентной нейронной сети / В.Б. Немировский, А.К. Стоянов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 205-210. – EDN PVBDGX.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 519.688

EDN: QSXZRX

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ЛИНЕЙНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7724-0781

AuthorID: 1119175

ORCID: 0009-0008-2283-5240

ЕЛИНОВ Дмитрий Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника»
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail: edorm86a@gmail.com),

SPIN: 9739-3030

AuthorID: 1290035

ORCID: 0009-0005-2084-5734

ХОЛКИНА Виктория Михайловна, студент
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: mavika884@gmail.com)

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: 607401

ORCID: 0000-0002-3851-0933

Scopus ID: 56755458400

ResearcherID: GWC-7253-2022

ПОЛЯНСКАЯ Екатерина Александровна, кандидат биологических наук, доцент,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»
Пензенский государственный университет
(440026, г. Пенза, ул. Красная, 40, E-mail: polyanka05@mail.ru)

Аннотация. В статье рассматривается применение линейной нейронной сети для краткосрочного прогнозирования поведения ветра. Особое внимание уделяется влиянию соотношений размера входного и выходного окна на скорость обучения моделей с одним слоем и точность получаемых результатов по среднеквадратической функции потерь и скорости обучения модели. Проводится исследование для размеров входных и выходных окон от 1 до 48 измеренных и прогнозируемых значений с переменным шагом. Определяются конфигурации однослойной нейронной сети, с оптимальным количеством нейронов в скрытом слое. Оптимизация производится на основе данных по среднеквадратической функции потерь для тестовых данных у обученных моделей. Делаются выводы о влиянии количества нейронов в скрытом слое, величины входных и выходных окон на точность прогнозирования.

Ключевые слова: ветроэнергетика, прогнозирование ветроэнергетики, прогнозирование временных рядов, машинное обучение, длинная краткосрочная память.

RESEARCH OF WIND SPEED PREDICTION ACCURACY WITH USING MULTISTAGE LINEAR NEURAL NETWORK

© The Authors 2025

ELINOV Dmitriy Aleksandrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering
Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: edorm86a@gmail.com),

KHOLKINA Viktoria Mikhailovna, student
Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: mavika884@gmail.com)

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)

POLYANSKOVA Ekaterina Alexandrovna, candidate of biological sciences, docent,

associate professor of the Department of Technosphere Safety
Penza State University
(440026, Penza, Krasnaya st., 40, E-mail: polyanka05@mail.ru)

Abstract. The article considers the application of a linear neural network for short-term forecasting of wind behavior. Particular attention is paid to the influence of the ratio of the input and output window sizes on the training speed of single-layer models and the accuracy of the results obtained for the mean square loss function and the model training speed. A study is conducted for the sizes of input and output windows from 1 to 48 measured and predicted values with a variable step. Configurations of a single-layer neural network with an optimal number of neurons in the hidden layer are determined. Optimization is based on the mean square loss function for test data in trained models. Conclusions are made about the influence of the number of neurons in the hidden layer, the size of the input and output windows on the accuracy of forecasting.

Keywords: wind power, wind power forecasting, time series forecasting, machine learning, convolutional neural networks, long short-term memory.

Для цитирования: Елинов Д.А. Исследование точности прогнозирования скорости ветра с использованием многослойной линейной нейронной сети / Д.А. Елинов, В.М. Холкина, А.И. Мартышкин, Е.А. Полянская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 84-90. – EDN: QSXZRX.

Введение. Ветроэнергетика занимает ключевое место среди источников альтернативной энергии. По данным за 2022 год, доля электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками, составляет 7,3% от общего мирового энергопроизводства [1] и 21,8% в структуре возобновляемых источников энергии [2]. Существенным особенностью ветровой генерации является высокая степень вариабельности выработки, как в пределах суток, так и на сезонных временных масштабах. На рисунке 1 приведён график изменения скорости ветра на территории аэропорта города Пензы.

Исследованию потенциала ветроэнергетики

на территории Пензенской области посвящены научные работы [3-5], в которых рассматриваются перспективы внедрения различных типов ветрогенераторов для целей электроэнергетики. Большое внимание при этом уделяется задаче краткосрочного прогнозирования, особенно на горизонте «сутки вперёд», что имеет критическое значение для стабильности энергосистемы в условиях высокой доли ветровой генерации. Надёжный и своевременный прогноз скорости ветра позволяет эффективно компенсировать колебания в выработке энергии, в частности – посредством корректировки режимов работы пиковых электростанций.

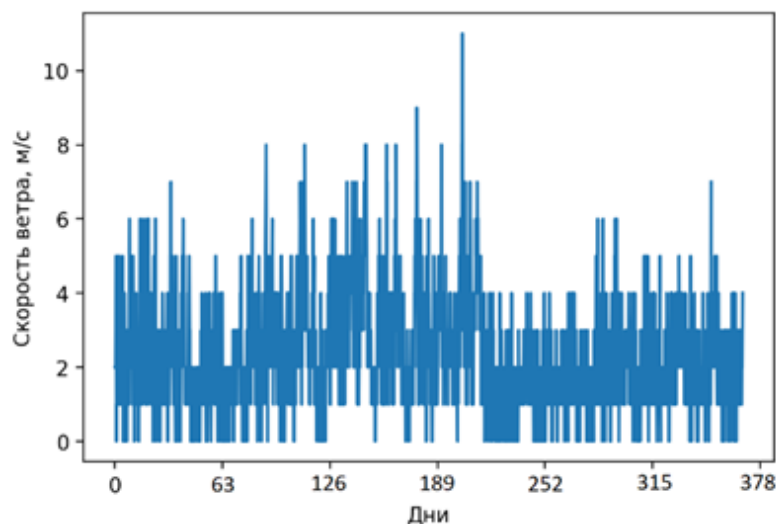


Рисунок 1 – Изменение в течение года скорости ветра по данным метеостанции аэропорта г. Пензы

На протяжении последних десятилетий для прогноза ветровых параметров применялись различные подходы: от физико-математических моделей и численного прогноза погоды (NWP) до статистических, вероятностных и интеллектуальных методов, включая гибридные и ансамблевые решения. В последние годы наблюдается устойчивый

сдвиг в сторону методов машинного обучения (ML), продиктованный высокой точностью и способностью таких моделей выявлять надёжные закономерности в сложных данных [6, 7]. Эти методы успешно применяются как в задачах, связанных со стационарными объектами [8, 9], так и в мобильных системах [10-14]. Ряд исследований

[15-20] демонстрирует высокую эффективность использования нейронных сетей для задачи прогнозирования скорости ветра, что подтверждает актуальность и перспективность данного направления. В настоящей работе рассматривается применение методов глубокого обучения на основе нейросетевых архитектур для прогнозирования скорости ветра по данным, полученным с метеостанции аэропорта г. Пензы.

Методология. В этом исследовании для прогнозирования точности скорости ветра использовался метод глубокого обучения с применением модели линейных нейронных сетей. Анализируя временные ряды на основе результатов обучения для прогнозирования скорости ветра, данные временных рядов можно разделить на одномерные и

многомерные в зависимости от этого будут применяться одноступенчатые или многоступенчатые модели прогнозирования, показанные на рисунке 2. Одноступенчатое прогнозирование способно предсказывать одну точку вперед каждый раз, но не способно предсказывать непрерывные изменения в пределах шага. Многоступенчатые модели вместо одной точки анализа в каждой точке времени для составления прогнозов используют одну или последовательность точек анализа, которые прогнозируются с помощью двух или более переменных. Учитывая эти характеристики для поставленной задачи прогнозирования следует использовать многоступенчатую модель.

Для многоступенчатой модели структура окна примет вид, представленный на рисунке 3.

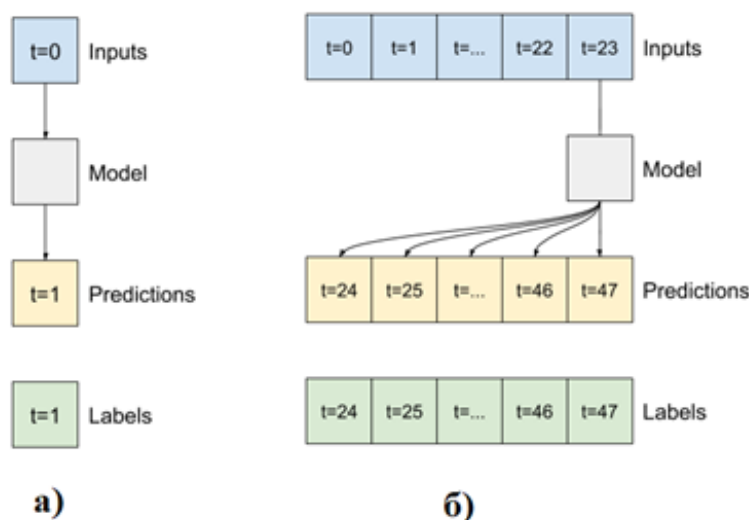


Рисунок 2 – Линейная модель: а) одноступенчатая; б) многоступенчатая

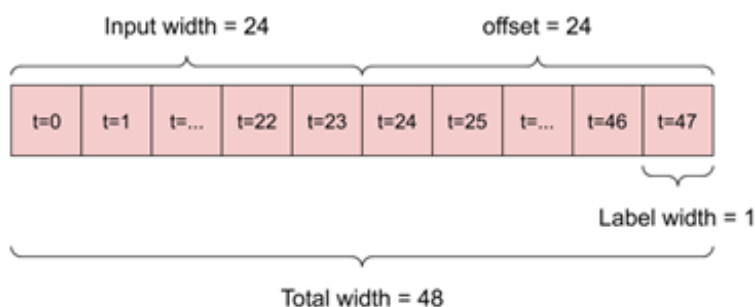


Рисунок 3 – Структура окна данных при использовании многоступенчатой модели

Количество элементов данной входной последовательности равно 24 (от $t=0$ до $t=23$). Смещение 24 указывает, что последовательность меток начинается после 24 элементов входной последовательности. Общая ширина представляет собой совокупный размер входных последовательностей и последовательностей меток (48).

Структура линейной модели в *Python PyTorch* следующая:

Model(

```
(fc): Sequential(
  (0): Linear(in_features=input width, out_features=N,
    bias=True)
  (1): Sigmoid()
  (2): Linear(in_features=N, out_features=output width,
    bias=True)
)
```

Для количественной оценки точности прогноза применяется соответствующая функция потерь следующего вида:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}, \quad (1)$$

где MSE – среднеквадратическая функция потерь, y_i – прогноз, x_i – истинное значение, n – общее количество наблюдений.

В ходе работы будет рассчитываться MSE для различных соотношений входных и прогнозируемых значений внутри окна данных (от 1 до 48 часов входных значений и от 1 до 48 часов прогнозируемых значений). Сравнение прогнозируемой и фактической скорости ветра для трех различных моделей показано на рисунке 4.

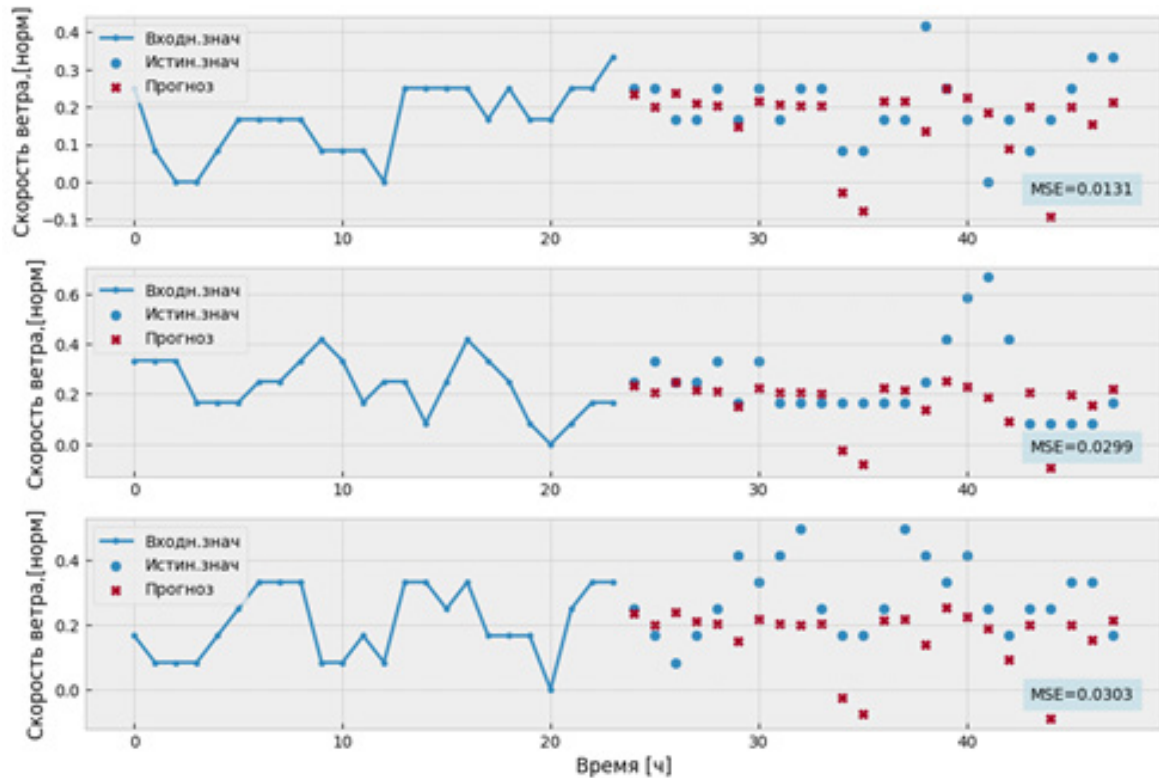


Рисунок 4 – Распределение нормированных значений скоростей ветра внутри окон данных, а также прогнозируемых значений

На основании полученных графиков, модель с более низким MSE (0,0131) работает лучше всего, поскольку ее прогнозируемая скорость ветра ближе к фактическим значениям.

Результаты. Эффективное прогнозирование данных требует оптимального выбора архитектуры нейронной сети, в частности – количества нейронов в скрытом слое. В процессе обучения однослойных моделей было установлено, что соотношение размеров входного и выходного окон оказывает существенное влияние на динамику сходимости. В ходе моделирования были получены прогнозные значения скорости ветра в пределах заданного временного окна (от 1 до 48 часов входных значений и от 1 до 48 часов прогнозируемых значений) (рис. 5).

Из полученных результатов видно, что использование более 16 нейронов в скрытом слое избыточно при заданной конфигурации объема данных входных и выходных значений.

Таким образом окончательная конфигурация нейронной сети будет следующая:

Model(

(fc): Sequential(
(0): Linear(in_features=input width, out_features=16, bias=True)
(1): Sigmoid()
(2): Linear(in_features=16, out_features=output width, bias=True)
)

На рисунке 6 представлены значения среднеквадратической ошибки модели с 16 нейронами в скрытом слое для различных соотношений входных и прогнозируемых значений внутри окна данных (от 1 до 48 часов входных значений и от 1 до 48 часов прогнозируемых значений).

Анализ результатов показал, что величина среднеквадратической ошибки демонстрирует незначительную чувствительность к объему используемой исходной информации, тогда как основной фактор влияния – глубина прогнозного горизонта. При этом характерный уровень среднеквадратической ошибки составляет порядка 0,015. Для подтверждения данных наблюдений произведено также моделирование сети с 48 нейронами в скрытом слое (рис. 7).

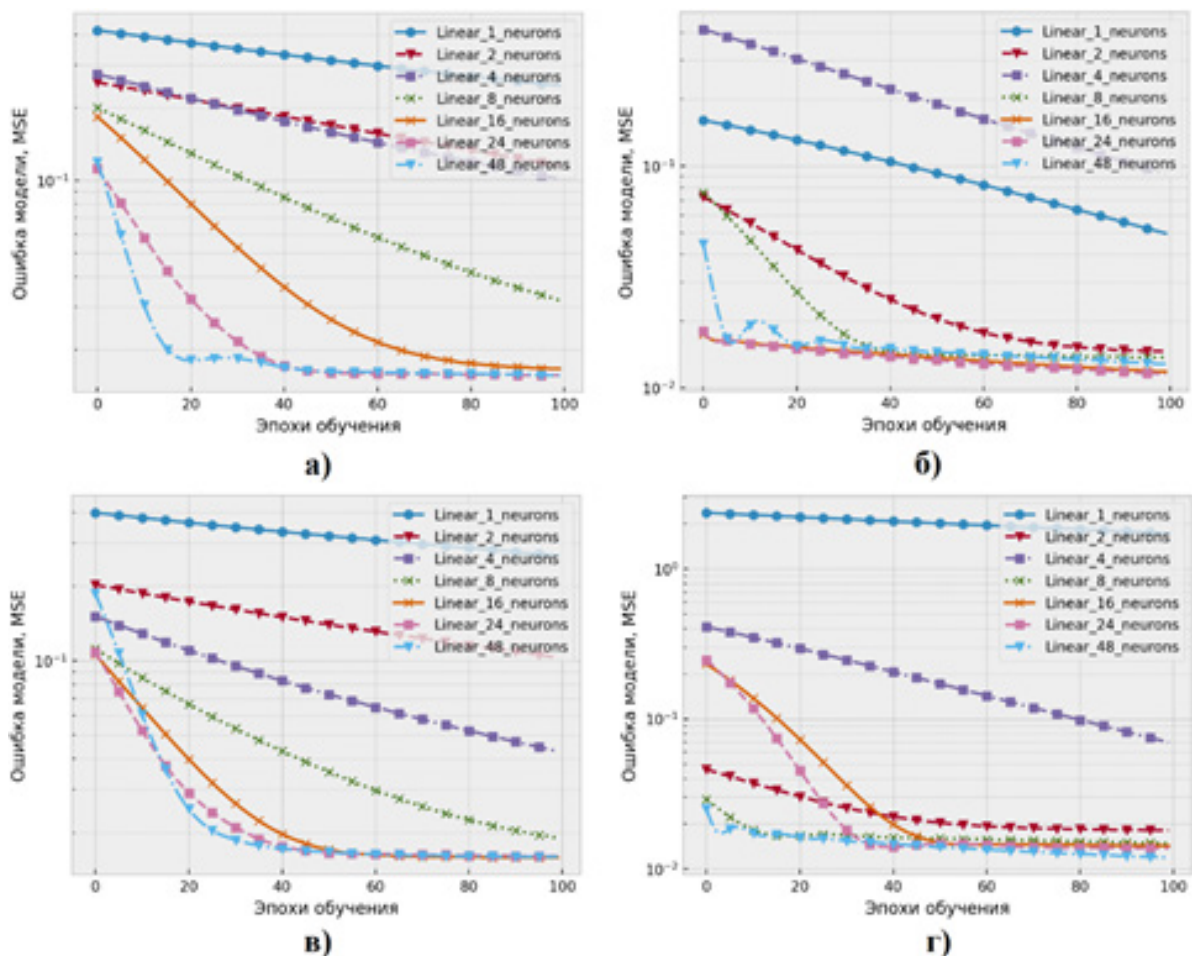


Рисунок 5 – Исследование скорости обучения нейронной в зависимости от объема входных и прогнозируемых данных:
а) учет 24 значений при прогнозе 12 значения; б) учет 24 значений при прогнозе 1 значения;
в) учет 48 значений при прогнозе 24 значений; г) учет 48 значений при прогнозе 1 значения

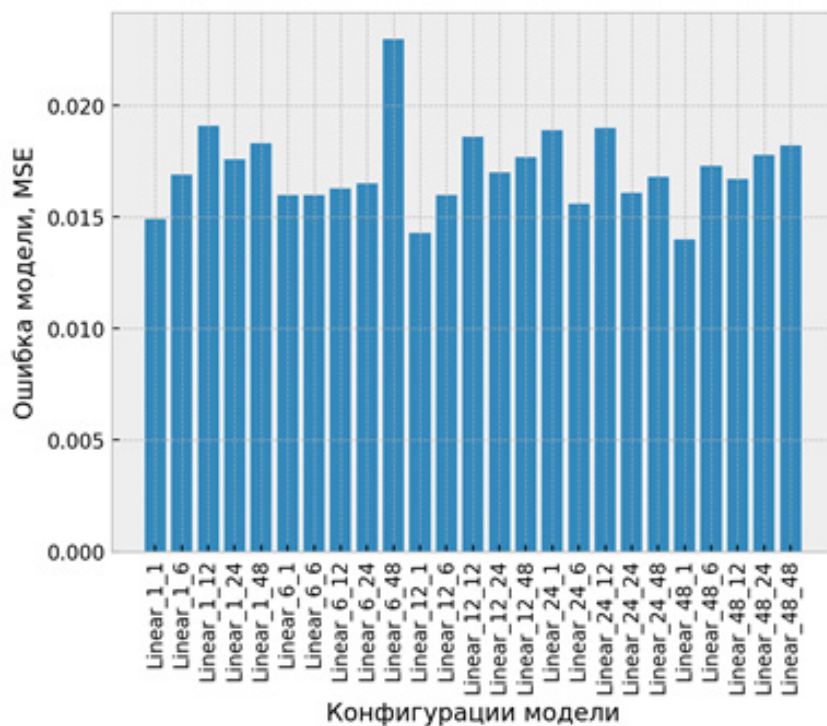


Рисунок 6 – Значения среднеквадратической ошибки модели с 16 нейронами в скрытом слое

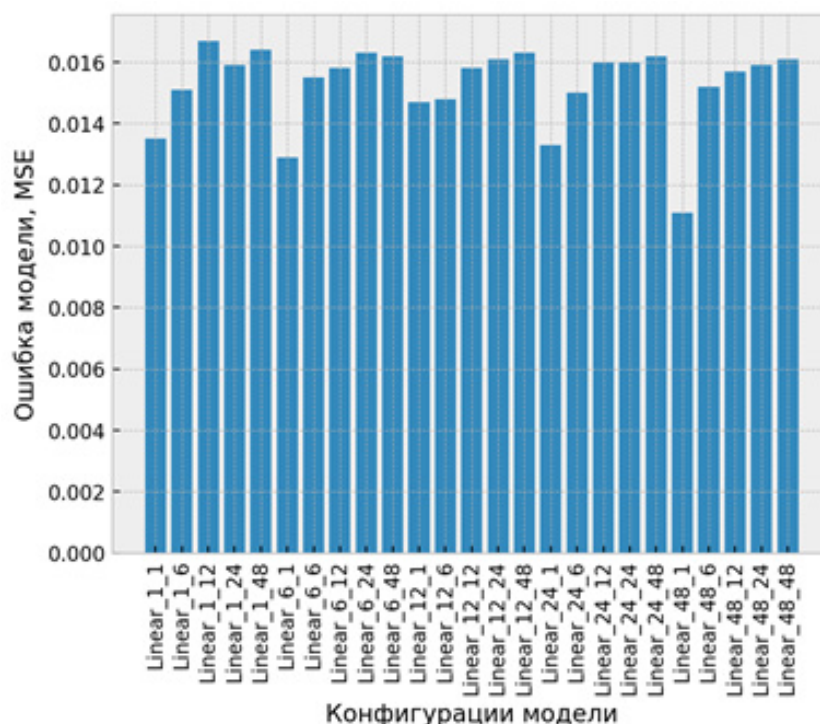


Рисунок 7 – Значения среднеквадратической ошибки модели с 48 нейронами в скрытом слое

Обсуждение. Полученные данные подтверждают высказанную ранее гипотезу о малой эффективности увеличения количества нейронов более 16 для рассматриваемой конфигурации входных и прогнозируемых значений. При этом зависимость значения среднеквадратической ошибки от глубины прогнозирования становится более явной.

Если сравнить полученные результаты со значениями среднеквадратичной ошибки для прогно-

зирования по среднему значению (рис. 8), то можно увидеть, что наибольший выигрыш по точности прогнозирования однослойная линейная нейронная сеть дает при малой глубине входных данных и большой глубине прогнозирования.

При большом объеме входных данных прогнозирование по среднему значению сравнивается по точности прогнозирования с однослойной линейной нейронной сетью.

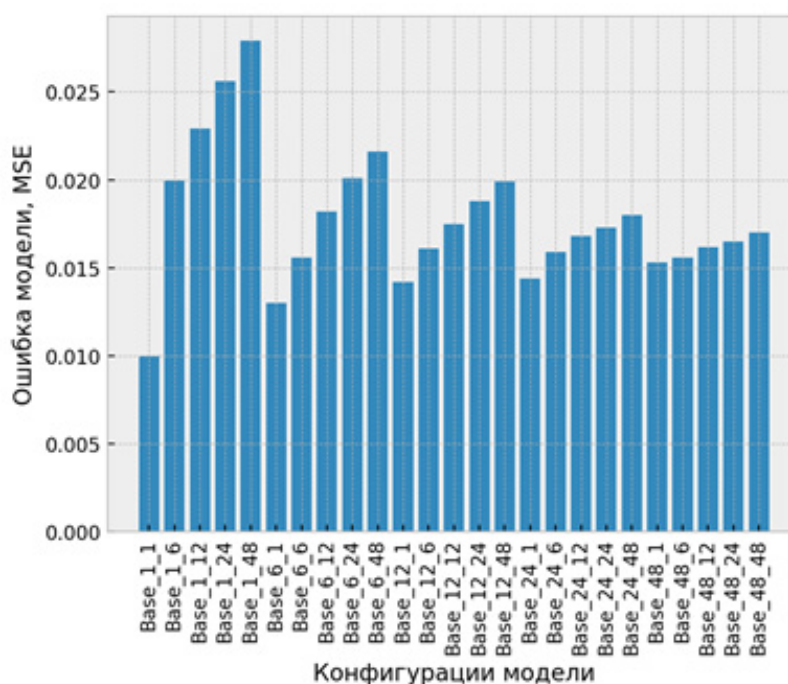


Рисунок 8 – Значения среднеквадратичной ошибки модели прогнозирования по среднему значению

Выводы. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. Для прогнозирования скорости ветра на временном промежутке до 48 часов с учетом истории измерений за 48 часов оптимальной конфигурацией однослойной нейронной сети будет являться нейронная сеть с 16 нейронами в скрытом слое. На ошибку прогнозирования в большей степени влияет глубина прогнозирования, чем глубина входных данных на основе истории измерений. При малом объеме входных данных и большой глубине прогнозирования точность прогнозирования однослойной нейронной сети превышает точность прогнозирования по среднему значению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Our World in Data [Электронный ресурс]. – URL: <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-wind?tab=table> (дата обращения: 25.03.2025).
2. Международное энергетическое агентство (IEA) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/electricity> (дата обращения: 27.03.2025).
3. Елинов Д.А., Бирюкова О.В., Долотин А.И. Оценка возможности применения ветровых турбин для генерации электроэнергии на территории Пензенской области // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 97-105.
4. Ashanin V., Elinov D., Birjukova O. Prospects for Using Vertical-Axis Wind Turbines in the Context of Current Urban Development // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – 2022. – С. 231-235.
5. Холкина В.М., Елинов Д.А., Артюшина Е.А., Данилова Е.А. Разработка устройства измерения характеристик ветра и передачи данных по интерфейсу BLE // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2022. – Т. 2. – С. 85-87.
6. Cifuentes J., Marulanda G., Bello A., & Reneses J. Air Temperature Forecasting Using Machine Learning Techniques: A Review // Energies. – 2020. – 13(16). – 4215. – DOI:10.3390/en13164215.
7. Rodriguez M.A., Sotomonte J.F., Cifuentes J., Bueno-López M. A Classification Method for Power-Quality Disturbances Using Hilbert–Huang Transform and LSTM Recurrent Neural Networks. Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2020. – Т. 16. – С. 249-266.
8. Tavakoli N. Modeling Genome Data Using Bidirectional LSTM // Proceedings of the 2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), 2019. – Т. 2. – С. 183-188.
9. Staudemeyer R.C., Morris E.R. Understanding LSTM – a tutorial into Long Short-Term Memory Recurrent Neural Networks // arXiv preprint arXiv:1909.09586. – 2019.
10. Власенко А.О., Гузнова А.Д., Прокин А.А. Тенденции развития мобильных приложений // E-Scio. – 2023. – № 5 (80). – С. 387-395.
11. Мэннинг Д., Баттфилд-Эддисон П. Head First. Изучаем Swift / Пер. с англ. Е. Матвеева. – СПб.: Питер, 2023. – 400 с.
12. Пацей Н.В. Разработка мобильных приложений. Учебно-методическое пособие. – Минск: БГТУ, 2020. – 265 с.
13. Мартышкин А.И., Коленчук А.В., Новиков А.В., Бершадская Е.Г. Обзор наиболее популярных мобильных приложений для изучения языка программирования Swift // Современные информационные технологии. – 2023. – № 38 (38). – С. 117-119.
14. Школьников В.С. Разработка интерактивной веб-платформы для образовательных викторин с использованием HTML, CSS, JavaScript // Молодёжная наука Севера: сборник материалов I Международной научно-практической конференции. В 3-х частях. Ханты-Мансийск, 2023. – С. 354-361.
15. Холкина В.М., Елинов Д.А., Данилова Е.А., Балгожиев А., Аяпов М.Т., Бекбалатов Н.А. Прогнозирование мощности ветрогенерации с использованием рекуррентных нейронных сетей на примере данных по Пензенской области // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2024. – Т.1. – С. 478-480.
16. Chen J., Guo Zh., Zhang L., Zhang Sh. Short-term wind speed prediction based on improved Hilbert–Huang transform method coupled with NAR dynamic neural network model // Scientific Reports. – 2024. – Т. 14. – № 1. – С. 617.
17. Amirteimoury F., Keynia F., Amirteimoury E., Memarzadeh G., Shabani H. A novel wind speed prediction model based on neural networks, wavelet transformation, mutual information, and coot optimization algorithm // Scientific Reports. – 2025. – Т. 15. – № 1. – С. 10860.
18. Valdivia-Bautista S.M., Domínguez-Navarro J.A., Pérez-Cisneros M., Vega-Gómez C.J., Castillo-Téllez B. Artificial Intelligence in Wind Speed Forecasting: A Review // Energies. – 2023. – Т. 16. – № 5. – С. 2457.
19. Li Ke., Shen R., Wang Zh., Yan B., Yang Q., Zhou X. An efficient wind speed prediction method based on a deep neural network without future information leakage // Energy. – 2023. – Т. 267. – С. 126589.
20. Leme Beu, C. M., Landulfo, E. Machine-learning-based estimate of the wind speed over complex terrain using the long short-term memory (LSTM) recurrent neural network // Wind Energy Science. – 2024. – Т. 9. – № 6. – С. 1431-1450.

Статья поступила в редакцию 24.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.942

EDN: QSPQWW

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОЦЕНКИ СИСТЕМ НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

© Автор(ы) 2025

SPIN-код: 7198-5521

AuthorID: 415365

ORCID: 0000-0002-7495-1090

ПРОКОФЬЕВ Олег Владимирович, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Информационные технологии и системы»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail Prokof_ow@mail.ru)

Аннотация. Системы на основе искусственного интеллекта (ИИ) активно внедряются в производственные процессы, в автономном транспорте, в здравоохранении, обороне, в аналитических агентствах, образовании, государственном управлении. В расчёте на увеличение эффективности работы частные компании и государственные институты планируют значительные капиталовложения в развитие центров обработки данных, совершенствование больших языковых моделей ИИ, создание генеративного ИИ, масштабирование и разработку новой архитектуры, а также рассчитывают на внедрение разработок в свои бизнес-процессы. Прогнозирование технических характеристик систем позволяет оценить достижимость поставленных задач, сравнивать требования с ожидаемыми возможностями ИИ в ближайшем будущем. Это исследование посвящено моделированию закономерностей развития технических характеристик систем с ИИ и оценке возможности их прогнозирования. Представлены результаты корреляционного и регрессионного анализа статистических данных, охватывающих широкий круг данных по странам мира за последние десятилетия. Выявлены проблемы прогнозирования, связанные с неоднородностью и неустойчивостью наблюдений временных рядов, предложены способы их преодоления. Описаны качественные изменения в эволюции систем, вызывающие замедление роста и переход к развитию экономически выгодных специализированных систем для предметных областей. На основе этого предложена обобщённая регрессионная модель прогнозирования, основанная на применении инструментальных переменных, выражающих в количественной форме принадлежность модели к классу специализированных систем.

Ключевые слова: искусственный интеллект, прогноз временного ряда, количество точек данных, число параметров искусственного интеллекта, количество вычислений при обучении.

PATTERNS OF DEVELOPMENT AND PROSPECTIVE ASSESSMENTS OF SYSTEMS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

© The Author(s) 2025

PROKOFIEV Oleg Vladimirovich, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of Information Technologies and Systems

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, BaydukovProyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail Prokof_ow@mail.ru)

Abstract. Artificial intelligence (AI)-based systems are being actively implemented in production processes, autonomous transport, healthcare, defense, analytical agencies, education, and public administration. In anticipation of increased efficiency, private companies and government institutions plan significant investments in the development of data centers, improvement of large AI language models, creation of generative AI, scaling and development of new architecture, and also expect to implement developments in their business processes. Forecasting the technical characteristics of systems allows us to assess the achievability of the tasks set, compare requirements with the expected capabilities of AI in the near future. This study is devoted to modeling the patterns of development of technical characteristics of AI systems and assessing the possibility of their forecasting. The results of correlation and regression analysis of statistical data covering a wide range of data on countries of the world over the past decades are presented. Forecasting problems associated with the heterogeneity and instability of time series observations are identified, and ways to overcome them are proposed. Qualitative changes in the evolution of systems are described, causing a slowdown in growth and a transition to the development of economically advantageous specialized systems for subject areas. Based on this, a generalized regression forecasting model is proposed, based on the use of instrumental variables that express in quantitative form the belonging of the model to the class of specialized systems.

Keywords: artificial intelligence, time series forecast, number of data points, number of artificial intelligence parameters, number of training computations.

Для цитирования: Прокофьев О.В. Закономерности развития и перспективные оценки систем на базе искусственного интеллекта / О.В. Прокофьев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 91-97. – EDN: QSPQWW.

Введение. В настоящее время расширяется диапазон возможностей искусственного интеллекта (ИИ), который сейчас включает в себя обработку речи, звука, рассуждения, компьютерное зрение (анализ изображений и видео), принятие решений автономными системами, применение робототехники и обучающие системы [1]. Заметны достижения в области улучшения встраиваемых моделей ИИ [2], больших языковых моделей *LLM* с помощью подсказок, оптимизации и тонкой настройки [1]. Технические характеристики систем на базе ИИ прошли большой эволюционный путь, причём в последние годы наблюдается увеличение скорости

их роста. Созданы большие информационные базы [3-5], описывающие динамику этих процессов, в том числе, с точки зрения технико-экономических характеристик, рисков применения, вреда окружающей среде, этических проблем сравнения с результатами человеческого труда.

Энтузиазм в среде инвесторов, планирующих внедрение разработок в области ИИ, показан на примере диаграммы на рисунке 1, на которой изображены результаты опроса 2835 респондентов: от директоров до руководителей высшего звена международных компаний по всему миру (опрос Deloitte [4], планы на 2024 год).



Рисунок 1 – Основные преимущества, которых глобальные организации надеются достичь с внедрением генеративного искусственного интеллекта (ИИ)

Понимание закономерностей процессов развития позволяет принять стратегические решения для развития предприятия с учётом наиболее вероятных реалий ближайшего будущего. Изучение данных и описание связей между ними средствами статистики является нетривиальной задачей даже при наличии массивов статистических данных [3-5] и специальных калькуляторов [6]. Количественные прогнозы и качественные перспективные оценки технических характеристик систем с ИИ позволяют подготовиться к предстоящей работе в конкурентной высокотехнологической среде ближайшего будущего.

Поэтому целью исследования является выявление основных закономерностей развития систем искусственного интеллекта, моделирование процессов роста технических характеристик и оценка возможностей построения краткосрочных прогнозов.

Методология. Статистические данные о технических характеристиках моделей ИИ в источниках [3-4], зачастую, представлены неполным набором значений, причём с неравномерным шагом во времени (неравномерными датами появления) и большой неустойчивостью. Кроме того, в статистических данных [3-4] содержатся упоминания об изломах и разрывах некоторых трендов в 2010 году в связи с достижениями методов глубокого обучения и применением больших наборов данных для обучения. Поэтому

для корректной обработки данных потребовался этап предварительного анализа ансамбля реализаций временных рядов, в том числе, с целью исключения наблюдений для моделей ИИ, имеющих только частично описанные параметры. В процессе исследования использованы методы корреляционного параметрического и непараметрического анализа, регрессионного анализа, метод логической индукции. Используются временные ряды перечисленных ниже переменных.

Количество вычислений при обучении известных моделей ИИ в петафлопах, равных 10^{15} операций с плавающей точкой (обозначено на иллюстрациях как *Computation*). На величину вычислений для обучения в системах ИИ влияют размер набора данных, используемых для обучения, сложность архитектуры модели, параллельное использование нескольких процессоров. Конкретные способы дизайна также дополнительно способствуют сложности вычислений для машинного обучения.

Число параметров, то есть количество переменных в системе искусственного интеллекта (обозначено на иллюстрациях как *Parameters*), значения которых корректируются в процессе обучения, чтобы определить, как нормируются входные данные и преобразуются в заданный результат. Например, веса связей в модели нейронной сети. Общее количество параметров в модели увеличивается

при использовании более сложных моделей с дополнительными слоями, архитектур глубокого обучения. С одной стороны, большее количество параметров поможет понять сложные закономерности данных, что теоретически приводит к более высокой точности. С другой стороны, когда у модели слишком много параметров, она может запомнить конкретные примеры в обучающих данных, но не выявить их базовые закономерности. Помимо проблемы достижения баланса параметров, существует вопрос стоимости вычислений высокопроизводительных моделей с числом параметров порядка миллиардов и

триллионов.

Количество точек данных, используемых при обучении (обозначено на иллюстрациях как *DatapointsSize*), отображает объем данных, используемых для эффективного обучения модели искусственного интеллекта и соответствует количеству примеров, на которых обучается модель. Большее количество точек способствует улучшению распознавания, глубокому и разностороннему "пониманию" предмета моделью.

Результаты. Визуальное изображение данных, описывающих параметры моделей ИИ до 2024 года включительно, показано на рисунке 2.

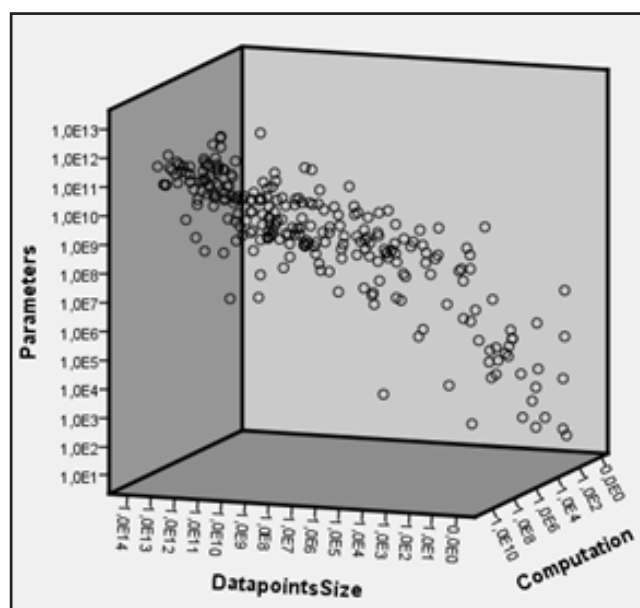


Рисунок 2 – Модели ИИ в системе координат
"Количество вычислений - Количество точек данных - Число параметров"

Набор данных затрагивает различные области применения, включая предиктивную аналитику, обработку естественного языка, робототехнику и другие. Корреляционный анализ проведен для наборов данных с характеристиками моделей ИИ без пропусков, использовано 261 наблюдение каждого временного ряда (статистику по рассматриваемой теме фиксируют с 1950-х годов [3,4]). Небезосновательно предположение о том, что процесс эволюции параметров систем может описываться общими временными трендами, что приводит к возникновению явления мультиколлинеарности и необходимости уменьшить влияние этого явления. Поэтому представляет интерес матрица частных корреляций между техническими характеристиками с исключением влияния фактора времени *DateC* (рис. 3).

Рисунок 3 свидетельствует о закономерности – средней силе связи между количеством вычислений и количеством точек данных. На рисунке 4 изображена матрица ранговой корреляции Спирмена, относящаяся к инструментам непараметрической статистики. Порядковый коэффициент позволяет, помимо самой оценки силы связей, снизить влияние

возможной нелинейной формы зависимости между случайными величинами. Судя по результатам на рисунке 4, порядковая статистика показывает тесные и значимые положительные связи между всеми величинами. Таким образом, возможно построение трендовых моделей, описывающих динамику научно-технического прогресса в области ИИ.

В источниках [3,4] даны рекомендации по аппроксимации временных рядов кусочными трендовыми моделями, относящимися к периодам до 2010 года и с начала 2010 года по настоящее время. Выводы авторов исследований [3,4] приведены в таблице 1.

Для описания временных рядов в процессе исследования построен набор моделей кривых роста, среди которых наибольшей долей объяснённой вариации зависимой величины обладали экспоненциальные модели. Результаты изображены на рисунках 5-7, где коэффициенты детерминации, соответственно, равны 0,49, 0,87 и 0,78. Рисунки 5-7 показывают не только высокую динамику процесса роста характеристик, но и большое рассеяние наблюдений относительно линии регрессии, что делает задачу построения прогнозов весьма проблематичной.

Корреляции					
Переменные управления			Computation	DatapointsSize	Parameters
DateC	Computation	Корреляция	1,000	,555	,200
		Значимость (двухсторонняя)	.	,000	,001
		ст.св.	0	258	258
DatapointsSize	Computation	Корреляция	,555	1,000	,219
		Значимость (двухсторонняя)	,000	.	,000
		ст.св.	258	0	258
Parameters	Computation	Корреляция	,200	,219	1,000
		Значимость (двухсторонняя)	,001	,000	.
		ст.св.	258	258	0

Рисунок 3 – Матрица парных частных корреляций

Корреляции						
			Computation	DatapointsSize	Parameters	DateC
По Спирмена	Computation	Коэффициент корреляции	1,000	,803**	,857**	,842**
		Знач. (двухсторонняя)	.	,000	,000	,000
		N	261	261	261	261
	DatapointsSize	Коэффициент корреляции	,803**	1,000	,817**	,698**
		Знач. (двухсторонняя)	,000	.	,000	,000
		N	261	261	261	261
	Parameters	Коэффициент корреляции	,857**	,817**	1,000	,762**
		Знач. (двухсторонняя)	,000	,000	.	,000
		N	261	261	261	261
	DateC	Коэффициент корреляции	,842**	,698**	,762**	1,000
		Знач. (двухсторонняя)	,000	,000	,000	.
		N	261	261	261	261

** . Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя).

Рисунок 4 – Матрица парных коэффициентов корреляции Спирмена

Таблица 1 – Средние темпы роста характеристик моделей ИИ

Параметры модели ИИ	Средний темп роста до 2010 года, %	Средний темп роста с начала 2010 года, %
Количество точек данных	130	250
Количество вычислений при обучении	150	460
Число оптимизируемых параметров	120	200

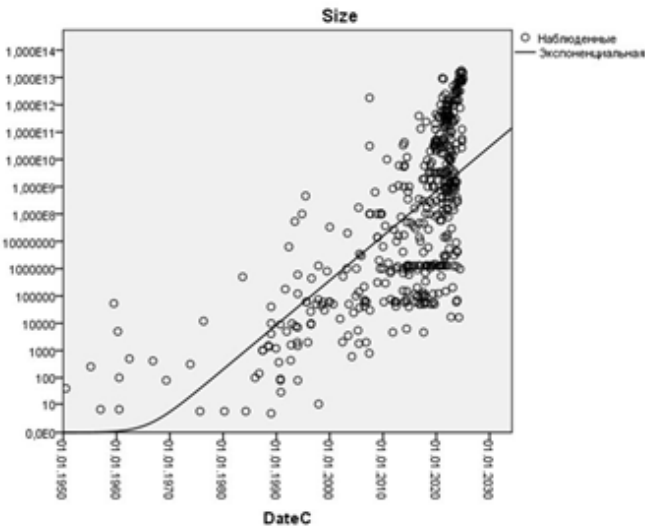


Рисунок 5 – Количество точек данных, используемых для обучения, 445 наблюдений за 1950-2024 г.г.

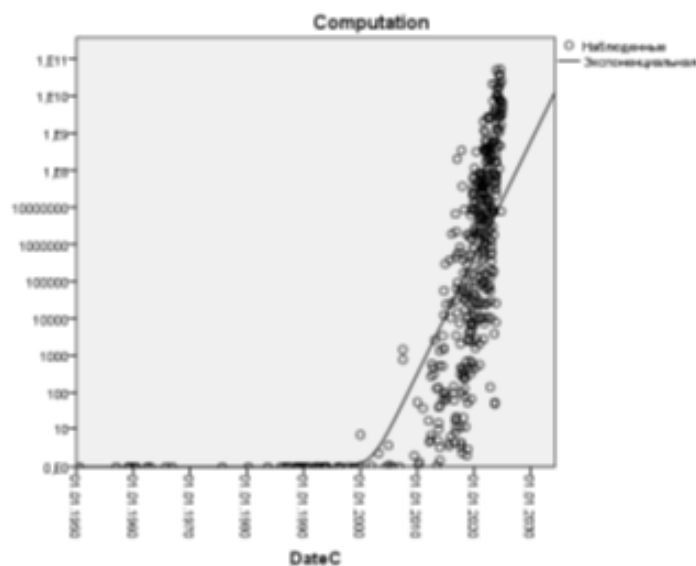


Рисунок 6 – Количество вычислений при обучении (петафлп), 447 наблюдений за 1950-2024 г.г.

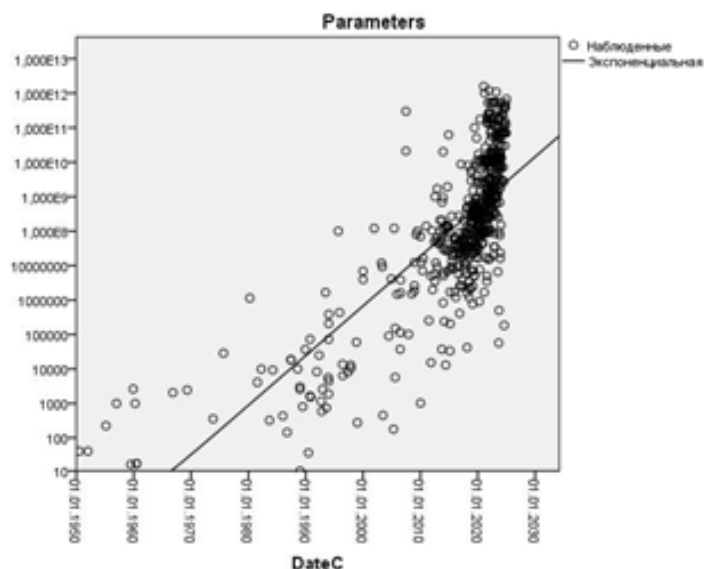


Рисунок 7 – Количество параметров, корректируемых при обучении, 594 наблюдения за 1950-2024 г.г.

Обсуждение. Возможен этап дальнейшего совершенствования моделей или создания наилучшей комбинированной модели регрессии, этап построения формальных прогнозов. Но проблема состоит не только в ширине интервалов прогнозов, но и в возникновении новых факторов, замедляющих скорость роста [8-17].

Энергетические затраты и нагрузка на экологическую среду. Растущие затраты электроэнергии для масштабируемых систем с ИИ требуют генерации всё больших мощностей, а это приводит к высокой стоимости обеспечивающей инфраструктуры и к увеличению выбросов углекислого газа [8]. Возобновляемые источники энергии пока составляют около 27% электроэнергии, потребляемой центрами обработки данных во всем мире [9]. На рисунке 8 изображены примеры зависимостей выбросов

парниковых газов, преобразованных в эквивалентное количество углекислого газа по потенциалу глобального потепления, от количества логических выводов ИИ в нескольких странах мира в 2023 году [8]. Продолжение текущих тенденций в области мощности и внедрения ИИ должно привести к тому, что, например, *NVIDIA* будет поставлять 1,5 миллиона единиц серверов ИИ в год к 2027 году, которые будут потреблять не менее 85,4 *Twh* электроэнергии в год, то есть больше, чем многие небольшие страны потребляют за год [10]. Охлаждение машин центров обработки данных может увеличить затраты энергии дополнительно до 50%.

Низкая экономическая эффективность. Затраты на разработку, обучение, эксплуатационные расходы могут оказаться выше ожидаемых, а результаты внедрения ИИ – ниже [13]. Стоимость полностью

внедренного решения на базе ИИ для большинства предприятий составляет от 20 000 долларов до миллионов [18]. При этом количество новых рабочих мест может быть больше сокращённых. Кроме того, без переобучения на новых производственных данных возникает угроза деградации системы.

Масштабирование не приводит к качественным изменениям. Опыт развития GPT-4 показал, что масштабирование модели приводит к небольшим улучшениям и экспоненциальному росту затрат [13].

Генеративный искусственный интеллект требует символьных рассуждений и понимания контекста проблемы, а большие языковые модели пока не способны полноценно формулировать сложные концепции.

Кроме того, сохраняются известные проблемы, снижающие эффект роста характеристик ИИ: ограничения по качеству и количеству данных для обучения, нерешённые этические проблемы и другие [8-17].

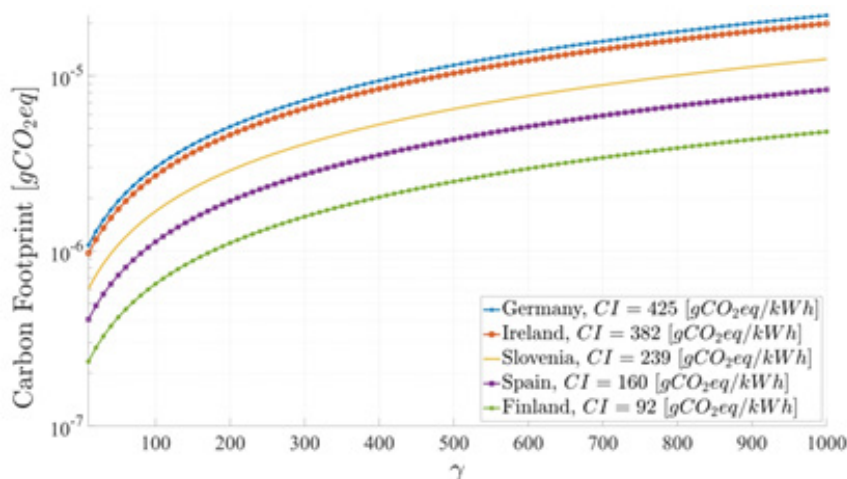


Рисунок 8 – Углеродный след в зависимости от количества логических выводов в системах с ИИ в странах мира

Выводы. Решения поставленных задач, перечисленных на рисунке 1, не в последнюю очередь зависят от характеристик внедряемых систем с ИИ, которые появятся в ближайшем будущем, а перспективные оценки технических возможностей систем сейчас не так однозначны по перечисленным ниже причинам.

1. Корреляционные связи между количеством вычислений в процессе обучения систем с ИИ, количеством точек данных для обучения модели ИИ, числом настраиваемых параметров являются тесными и значимыми, характеристики изменяются в одном направлении – в сторону роста. Однако создание регрессионных моделей для общей совокупности данных и построение прогнозов проблематично по причине неоднородных и неустойчивых данных. Прогнозирование по общей совокупности данных сейчас может быть осуществлено с помощью экспертных оценок.

2. Помимо значительного рассеяния наблюдений относительно линии моделей, было установлено, что процесс роста характеристик систем с ИИ недостаточно инерционный и не предполагает продолжение ранее сложившихся закономерностей. Возможно замедление наращивания характеристик [11], которое может быть математически описано (по мере накопления данных), например, с помощью S-образных кривых роста.

3. Наметившиеся сейчас тенденции развития, новые инженерные решения показывают перспективный подход, заключающийся в обучении специа-

лизированного ИИ для конкретных предметных областей и в создании компактных архитектур сети. Примерами новых направлений, не требующих наращивания энергетических и финансовых затрат и позволяющих преодолеть ограничения развития, являются:

- совместное использование нескольких подходов к машинному обучению и вероятностное программирование, которые приблизят ИИ к мышлению человека [13];
- внедрение эффективных методов квантизации, как, например, HIGGS (Hadamard Incoherence with Gaussian MSE-optimal GridS) для сжатия больших языковых моделей [19];
- удаление "неэффективных" синапсов и создание компактной модели ИИ для работы в предметной области [20].

Эволюционное разделение систем с ИИ на отдельные группы можно отобразить на следующем этапе исследования (и на формирующемся сейчас обновлённом наборе данных) в виде обобщённой регрессионной модели с набором инструментальных переменных, соответствующих новым структурно-алгоритмическим разновидностям систем. Мониторинг характеристик систем с ИИ, прогнозирование и принятие решений с помощью перспективных оценок позволяют избежать экономических потерь, снизить нагрузку на окружающую среду и обоснованно планировать развитие бизнес-процессов [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. The 2024 AI Index Report. Stanford Human-Centered Artificial Intelligence (HAI) Institute. <https://hai.stanford.edu/ai-index/2024-ai-index-report>.
2. Get embeddings. <https://replicate.com/collections/embedding-models>.
3. Data on AI. <https://epoch.ai/data>.
4. Our World in Data. Artificial Intelligence. By: Charlie Giattino, Edouard Mathieu, Veronika Samborska, and Max Roser. <https://ourworldindata.org/artificial-intelligence>.
5. Statista. Empowering people with data. Insights and facts across 170 industries and 150+ countries. <https://www.statista.com/research-ai/>.
6. OpenAI & all LLM API Pricing Calculator. <https://docsbot.ai/tools/gpt-openai-api-pricing-calculator>.
7. Google Trends. <https://trends.google.com/trends/>.
8. Chou, Shih-Kai & Hribar, Jernej & Mohorcic, Mihael & Fortuna, Carolina. (2024). The Energy Cost of Artificial Intelligence of Things Lifecycle. 10.48550/arXiv.2408.00540. https://www.researchgate.net/publication/382797643_The_Energy_Cost_of_Artificial_Intelligence_of_Things_Lifecycle.
9. IEA (2025), Energy and AI, IEA, Paris. Licence: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>.
10. Lauren Leffer (Oct 13, 2023). The AI Boom Could Use a Shocking Amount of Electricity. <https://www.scientificamerican.com/article/the-ai-boom-could-use-a-shocking-amount-of-electricity/>.
11. Sultan, Sahar, "Limitations Of Artificial Intelligence" (2021). Thesis. Rochester Institute of Technology. Accessed from <https://repository.rit.edu/theses/10975>.
12. Matthias Bastian (Mar 14, 2025). Most AI researchers are skeptical about language models achieving AGI. <https://the-decoder.com/most-ai-researchers-are-skeptical-about-language-models-achieving-agi/>.
13. Ben Turner (March 27, 2025). Current AI models a 'dead end' for human-level intelligence, scientists agree. https://www.livescience.com/technology/artificial-intelligence/current-ai-models-a-dead-end-for-human-level-intelligence-expert-survey-claims?utm_source=ixbtcom.
14. Artificial Intelligence and Privacy – Issues and Challenges. Office of the Victorian Information Commissioner. <https://ovic.vic.gov.au/privacy/resources-for-organisations/artificial-intelligence-and-privacy-issues-and-challenges/#introduction>.
15. Michael Schemel (27.05.2021). AI Use in IT, Challenges, and Limitations. <https://blog.usu.com/en-us/ai-use-in-it-challenges-and-limitations>.
16. Aditya Kumar (Apr 13, 2025) Top 15 Challenges of Artificial Intelligence in 2025. <https://www.simplilearn.com/challenges-of-artificial-intelligence-article>.
17. LUMENALTA (Aug. 27, 2024). AI's limitations: 5 Things artificial intelligence can't do. <https://lumenalta.com/insights/ai-limitations-what-artificial-intelligence-can-t-do>.
18. What are the advantages and disadvantages of artificial intelligence (AI)? (2025). Tableau for Salesforce. <https://www.tableau.com/data-insights/ai/advantages-disadvantages>.
19. Vladimir Malinovskii, Andrei Panferov, Ivan Ilin, Han Guo, Peter Richtárik, Dan Alistarh (26 Nov 2024). Pushing the Limits of Large Language Model Quantization via the Linearity Theorem. <https://arxiv.org/abs/2411.17525>.
20. Stephen Ornes (Apr 13, 2025). Small Language Models Are the New Rage, Researchers Say. <https://www.wired.com/story/why-researchers-are-turning-to-small-language-models/>.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 65.01

EDN: NBUPKQ

**МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ ОРГАНИЗАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ
ПРОАКТИВНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9852-6322

AuthorID: 1267869

ORCID: 0000-0002-9116-3897

ResearcherID: GZM-0102-2022

ПОДКИН Кирилл Игоревич, аспирант

*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
(117198, Россия, Москва, улица Миклухо-Маклая, 6, e-mail: 1142220974@pfur.ru)*

SPIN: 8702-4283

AuthorID: 788815

ORCID: 0000-0002-5017-0281

ScopusID: 57199505279

НАЗАРОВА Юлия Александровна, кандидат экономических наук

*доцент кафедры инновационного менеджмента в отраслях промышленности инженерной академии
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
(117198, Россия, Москва, улица Миклухо-Маклая, 6, e-mail: j.a.nazarova@mail.ru)*

SPIN: 7501-3304

AuthorID: 999843

ORCID: 0000-0002-7991-5283

ScopusID: 57401967400

БОЙКОВ Антон Алексеевич, аспирант

*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
(117198, Россия, Москва, улица Миклухо-Маклая, 6, e-mail: 1042200032@pfur.ru)*

Аннотация. В статье предложена модель системы проактивного управления проектами организационного развития, разработанная для энергетической отрасли и интегрирующая методы прогнозирования, сценарного анализа и множественной регрессии. Цель исследования заключается в разработке комплексного подхода к управлению проектами в условиях высокой неопределенности, характерной для энергетических компаний, с акцентом на снижение рисков и оптимизацию ресурсов. Методология включает математическое моделирование (множественная регрессия для оценки влияния факторов: производительность, численность персонала, интеллектуальный капитал), сценарный анализ для прогнозирования рисков, прогнозирование для оптимизации ресурсов в динамичной среде. Модель апробирована на примере энергетической компании, где показана ее эффективность на основе снижения неопределенности и оптимизации ресурсов. Полученные результаты демонстрируют, что проактивный подход позволяет снизить неопределенность на 8,41%, оптимизировать ресурсы и повысить адаптивность управления проектом. Установлено, что увеличение производительности труда на 8,00% приводит к росту объема работ на 2,58%, что эффективнее увеличения численности персонала. Разработанная модель, сочетающая количественные и качественные методы, подтвердила свою эффективность в условиях динамичной среды энергетической отрасли. Ее применение способствует своевременному выявлению отклонений, минимизации рисков и достижению стратегических целей. Предложенная модель может быть использована для управления проектами в энергетической отрасли и других отраслях промышленности с высокой степенью неопределенности.

Ключевые слова: проактивное управление, управление проектами, организационное развитие, множественная регрессия, сценарный анализ, прогнозирование рисков, энергетическая компания.

**MODEL OF PROJECT MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL DEVELOPMENT
BASED ON A PROACTIVE APPROACH TO MANAGEMENT IN AN ENERGY COMPANY**

© The Author(s) 2025

PODKIN Kirill Igorevich, post-graduate student

*Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
(117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6, e-mail: 1142220974@pfur.ru)*

NAZAROVA Yulia Aleksandrovna, candidate of economic sciences,

associate professor of department of innovation management in industries of academy of engineering

*Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba
(117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6, e-mail: j.a.nazarova@mail.ru)*

BOYKOV Anton Alekseevich, post-graduate student

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

(117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya street, 6, e-mail: 1042200032@pfur.ru)

Abstract. The article proposes a model of a proactive project management system for organizational development developed for the energy industry and integrating forecasting, scenario analysis and multiple regression methods. The purpose of the study is to develop an integrated approach to project management in conditions of high uncertainty typical for energy companies, with an emphasis on risk reduction and resource optimization. The methodology includes mathematical modeling (multiple regression to assess the impact of factors: productivity, headcount, intellectual capital), scenario analysis to predict risks, forecasting to optimize resources in a dynamic environment. The model is tested on the example of an energy company, where its effectiveness is demonstrated based on reducing uncertainty and optimizing resources. The results demonstrate that a proactive approach can reduce uncertainty by 8,41%, optimize resources and increase the adaptability of project management. It has been established that an 8,00% increase in labor productivity leads to an increase in the volume of work by 2,58%, which is more effective than an increase in the number of personnel. The developed model, combining quantitative and qualitative methods, has proven its effectiveness in the dynamic environment of the energy industry. Its application facilitates timely detection of deviations, minimization of risks and achievement of strategic goals. The proposed model can be used for project management in the energy industry and other industries with a high degree of uncertainty.

Keywords: proactive management, project management, organizational development, multiple regression, scenario analysis, risk forecasting, energy company.

Для цитирования: Подкин К.И. Модель управления проектами организационного развития на основе проактивного подхода к управлению в энергетической компании / К.И. Подкин, Ю.А. Назарова, А.А. Бойков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 98-107. – EDN: NBUPKQ.

Введение. В условиях растущей неопределенности и динамичности внешней среды, проактивный подход к управлению проектами становится ключевым инструментом для минимизации рисков и повышения эффективности управленческих процессов. Реактивное управление, подразумевающее реагирование на уже возникшие проблемы и отклонения, часто приводит к увеличению сроков реализации проектов, превышению бюджетов и снижению качества результатов. В связи с этим, возникает необходимость в разработке новой модели управления, ориентированной на прогнозирование и предотвращение потенциальных проблем, то есть на проактивный подход.

Несмотря на активное изучение проактивного подхода в проектной деятельности (Graessler I. et al. [1]; Smith P.G., Merritt G.M. [10]), большинство исследований носят общий характер и не адаптированы к специфике энергетической отрасли. Например, работы Li H. et al. [2] и Song W. et al. [3] фокусируются на прогнозировании сроков и бюджета проектов, но игнорируют влияние человеческого капитала и интеллектуальных ресурсов. В свою очередь, исследования по управлению рисками в энергетике (Суслов Е.Ю. [7]) ограничиваются качественными методами, не предлагая количественных инструментов для оптимизации решений. Научный пробел, который заполняет данное исследование, заключается в отсутствии комплексных моделей, сочетающих: прогнозирование рисков через сценарный анализ (аналоги Dombrowski M. et al. [12]); количественную оценку факторов организационного развития методом множественной регрессии (в отличие от работ Зотовой Е.В. [5], где регрессия применяется только к финансовым показателям); адаптацию проактивных принципов к энергетике с её уникальными вызовами (высокая капиталоемкость,

зависимость от регуляторной среды).

Проактивное управление (ПАУ) предполагает заблаговременное прогнозирование потенциальных проблем и разработку превентивных мер, что позволяет снизить негативные последствия и обеспечить успешную реализацию проектных целей [1, 2]. ПАУ особенно актуально в условиях высокой неопределенности, характерных для энергетической отрасли, где риски могут иметь значительные последствия для экономики и общества. Применение ПАУ позволяет не только снизить вероятность возникновения проблем, но и оптимизировать использование ресурсов, повышая эффективность управления проектами.

Научная новизна работы заключается в интеграции методов прогнозирования, сценарного анализа и множественной регрессии для повышения гибкости и адаптивности управления проектами в энергетической отрасли, что позволяет не только прогнозировать риски, но и количественно оценивать влияние факторов на результаты реализации проекта.

Применение проактивного подхода наблюдается в различных сферах управленческой деятельности, включая информационные технологии и программирование, управление проектами, управление предприятиями и другие области, что свидетельствует о его универсальности и адаптивности к различным контекстам. Принимая во внимание возможности применения ПАУ, представляется целесообразным дальнейшее расширение спектра его использования, что, в свою очередь, создает обширное поле для новых научных исследований, направленных на изучение особенностей и инструментария данного подхода, а также на поиск эффективных методов реализации проактивности посредством интеграции с другими методами в рамках общей методологии управления проектами [4]. Фундаментальной основой

проактивного управления являются модели и методы, предназначенные для прогнозирования будущих событий, происходящих во внешней или внутренней среде управляемой системы, которые, в свою очередь, формируют базис механизма управления, обеспечивая возможность заблаговременного принятия управленческих решений и предотвращения нежелательных последствий, что находит свое отражение в ряде научных работ, посвященных данной проблематике.

М.Е. Леонов и А.Н. Фомичев характеризуют проактивное управление как «опережающее управление или принятие решений с упреждением вероятных рисков». Они подчеркивают суть подхода, заключающуюся в превентивных действиях, направленных на предотвращение негативных последствий [6]. Авторы справедливо отмечают, что прогнозирование является одной из основных функций менеджмента, выделенной еще А. Файолем в 70-х годах XX века, и подчеркивает неразрывную связь проактивного управления с анализом и предвидением будущих событий.

Методология. Целью исследования является разработка модели системы на основе проактивного подхода к управлению проектами организационного развития энергетической компании, обеспечивающая снижение неопределенности за счет комбинации количественных и качественных методов, а также оптимизацию ресурсов на основе прогноза влияния факторов.

Методы, используемые для написания статьи: анализ данных, математическое моделирование, статистический анализ, экспериментальное исследование. Для достижения поставленной цели был проведен анализ литературных источников, а именно проведен обзор современных научных работ, посвященных проактивному управлению проектами. На основе изученных исследований с применением проактивного подхода была разработана модель системы проактивного управления проектами орга-

низационного развития адаптированная под условия энергетической среды и проверена на примере проекта организационного развития в энергетической компании. Одна из уникальных особенностей модели является объединение нескольких методов, таких как прогнозирование, сценарный анализ и множественная регрессия. Кроме этого, на основе метода множественной регрессии, который заключался в определении воздействия основных факторов на объем выполнения работ проекта, был проведен статистический анализ с использованием программного продукта *SPSS*, который в свою очередь позволил проанализировать полученные значения коэффициентов и проверить их статистическую достоверность.

Результаты. Энергетическая отрасль, являясь одной из ключевых отраслей экономики, требует применения современных методов управления для минимизации рисков и повышения эффективности. В условиях высокой неопределенности и консервативности отрасли, проактивный подход становится необходимым инструментом для управления проектами организационного развития. Разработанная модель системы проактивного управления позволяет прогнозировать потенциальные риски и разрабатывать альтернативные сценарии развития, что повышает адаптивность и гибкость управления проектами. Негативные последствия реактивного управления в проектах аргументируются тем, что к моменту осознания проблемы и принятия соответствующих мер, негативное влияние уже успевает укорениться в проекте, что делает его «искоренение из системы практически невозможным». Данный аргумент – в пользу проактивного подхода, особенно в контексте крупных и сложных проектов, где последствия ошибок могут быть особенно значительными.

На основе анализа современных литературных источников было проведено сравнение с реактивным управлением. Результаты сравнения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение проактивного и реактивного управления *

Параметр	Проактивное управление (ПАУ)	Реактивное управление	Комментарии
Прогнозирование	Заблаговременное выявление рисков	Реагирование на уже возникшие проблемы	ПАУ позволяет минимизировать риски
Управление ресурсами	Оптимизация на основе прогнозов	Реактивное распределение ресурсов	ПАУ повышает эффективность использования ресурсов
Адаптивность	Высокая	Низкая	ПАУ обеспечивает гибкость в условиях неопределенности

* составлено авторами на основе [3, 4, 5, 6, 7]

Исходя из вышеизложенного, можно отметить, что проактивный подход к управлению организационными проектами предполагает формирование гипотез о будущем состоянии проекта на основе прогнозных моделей. Проактивный подход дает возможность своевременно выявлять потенциальные риски и разрабатывать альтернативные сценарии развития, что повышает гибкость управления

и адаптивность к изменениям внешней среды организационного проекта. Благодаря проактивному подходу ресурсы организационного проекта оптимизируются, поскольку управление фокусируется на ключевых аспектах проекта, а не на достижении чрезмерной точности.

В условиях динамично изменяющейся внешней среды и растущей сложности проектов организа-

ционного развития в энергетической отрасли, традиционные методы управления, основанные на реактивном подходе, оказываются недостаточно эффективными. Реактивное управление, подразумевающее реагирование на уже возникшие проблемы и отклонения, часто приводит к увеличению сроков реализации проектов, превышению бюджетов и снижению качества результатов. В связи с этим возникла необходимость в разработке новой модели управления, ориентированной на прогнозирование и предотвращение потенциальных проблем, то есть на проактивный подход.

Именно поэтому предлагается модель управления проектом энергетической компании на основе проактивного подхода, предназначенная для руководства и проектных команд энергетических компаний, занимающихся реализацией проектов организационного развития. Она призвана обеспечить более эффективное управление проектами за счет:

- снижения неопределенности и формировать гипотезу о видении продукта проекта на основе прогнозирования, чтобы снижать степень неопределенности на ранних этапах и принимать обоснованные решения;
- реорганизации использования ресурсов, возможности выбора альтернативных вариантов реализации проекта в зависимости от ситуации и имеющихся ресурсов в каждой фазе выполнения;
- повышения эффективности управления, за счет заблаговременного планирования и предотвращения проблем, чтобы способствовать эффективному достижению целей проекта и оптимизации использования ресурсов.

Модель системы управления проектом организационного развития энергетической компании не просто описывает отдельные элементы проекта, а показывает, как они взаимосвязаны и работают вместе

для достижения цели. Разработанная модель системы обладает следующими преимуществами:

- обеспечивает возможность прогнозирования развития проекта и выявления потенциальных рисков и возможностей на основе анализа различных факторов, включая человеческие ресурсы и капитал;
- на основе прогнозов модель помогает разрабатывать детальные планы реализации проекта с учетом возможных альтернативных сценариев;
- предоставляет информацию и инструменты для принятия обоснованных управленческих решений на всех этапах реализации проекта;
- обеспечивает контроль за ходом выполнения проекта и своевременное выявление отклонений от плана;
- способствует оптимизации использования ресурсов проекта, а также человеческие ресурсы и капитал;
- подчеркивает важность информационного обеспечения и определяет объем информационных потребностей, связанных с проактивным подходом.

Результаты разработки модели системы управления проектом энергетической компании на основе проактивного подхода и краткое описание приведены на рисунке 1 и в таблице 2 соответственно.

Каждый блок в модели проактивного управления играет важную роль в обеспечении успешного выполнения проектов организационного развития. Блок-схема позволяет наглядно представить, как эти компоненты взаимодействуют между собой, обеспечивая гибкость, контроль и адаптивность системы.

Для реализации проактивного управления организационными проектами в энергетической отрасли были выбраны множественная регрессия и сценарный анализ, как наиболее релевантные методы, соответствующие целям исследования (табл. 3).

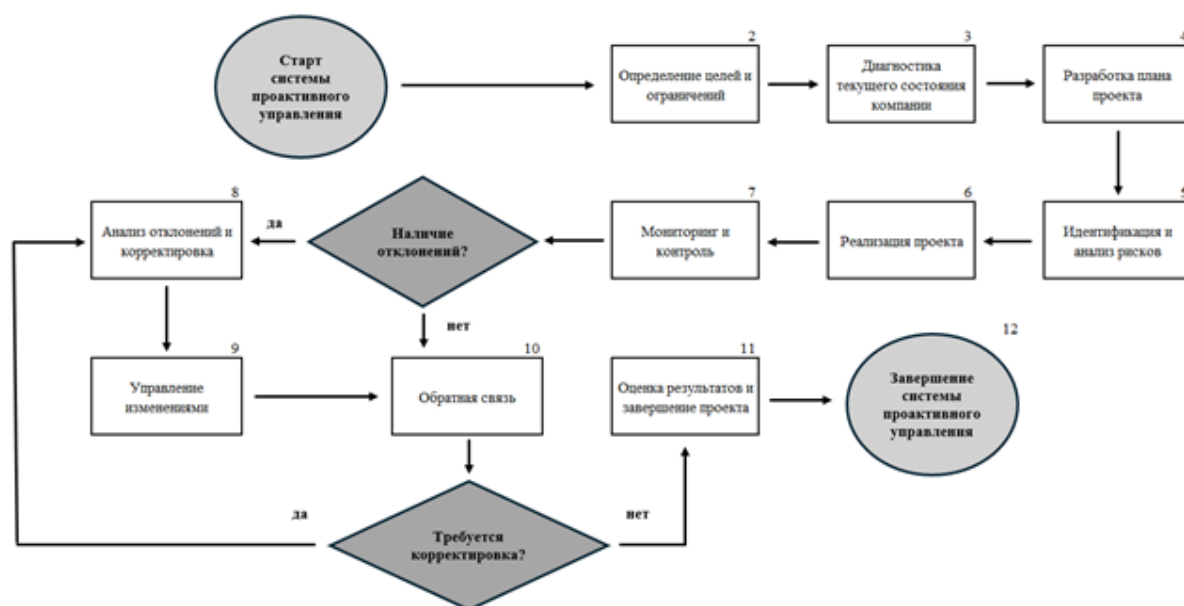


Рисунок 1 – Модель управления проектами организационного развития на основе проактивного подхода к управлению в энергетической компании (составлено авторами)

Таблица 2 – Описание модели управления проектом организационного развития на основе проактивного подхода к управлению в энергетической компании *

Название блоков	Наименование	Описание
Блок 1	Старт системы проактивного управления	Начало работы системы. Определение необходимости внедрения проактивного управления для достижения целей организационного развития
Блок 2	Определение целей и ограничений	Формулировка долгосрочных и краткосрочных целей организационного развития и оценка ресурсов для реализации организационного проекта
Блок 3	Диагностика текущего состояния компании	Анализ текущего состояния компании для выявления проблем, узких мест и возможностей
Блок 4	Разработка плана проекта	Планирование проекта, направленного на достижение стратегических целей
Блок 5	Идентификация и анализ рисков	Выявление потенциальных рисков, которые могут повлиять на выполнение проекта
Блок 6	Реализация проекта	Исполнение запланированных задач в рамках проекта
Блок 7	Мониторинг и контроль	Мониторинг и контроль выполнения проекта
Блок 8	Анализ отклонений и корректировка	Принятие решений по устранению отклонений и корректировке плана
Блок 9	Управление изменениями	Управление изменениями, связанными с внедрением новых процессов, технологий и корпоративной культуры
Блок 10	Обратная связь	Получение обратной связи для оценки эффективности внедренных изменений и процессов
Блок 11	Оценка результатов и завершение проекта	Подведение итогов выполнения проектов и анализ достигнутых результатов
Блок 12	Завершение системы проактивного управления	Окончание цикла проактивного управления проектом

* составлено авторами на основе рисунка 1

Таблица 3 – Преимущества выбранных методов для проактивного управления*

Множественная регрессия	Сценарный анализ
Позволяет количественно оценить влияние нескольких факторов (например, численность персонала, производительность, интеллектуальный капитал) на ключевой показатель — объем выполненных работ (Y_m)	Позволяет прогнозировать риски в условиях неопределенности (например, изменения законодательства, колебания спроса) и разрабатывать превентивные сценарии
Обеспечивает прозрачность модели: коэффициенты регрессии интерпретируются как вклад каждого фактора, что критично для принятия обоснованных управленческих решений	Учитывает качественные факторы (например, корпоративную культуру), которые невозможно формализовать в регрессионной модели
Требует умеренного объема данных (в отличие от машинного обучения, где необходимы большие выборки для обучения алгоритмов)	

* составлено авторами

Если сравнивать с альтернативными методами, то, к примеру машинное обучение могло бы улучшить точность прогнозов, но требует значительных вычислительных ресурсов и данных, что затруднительно для энергетических компаний с ограниченными ресурсами по цифровизации, также сложность интерпретации результатов снижает доверие менеджеров к модели; *SWOT*-анализ ограничивается статичной оценкой рисков, а Монте-Карло-моделирование фокусируется на вероятностных исходах, но не предоставляет конкретных управленческих решений.

Из-за специфики энергетической отрасли и ряда факторов модель управления проектом организационного развития на основе проактивного подхода к управлению в энергетической компании имеет

следующие ограничения (табл.4).

Для исследования влияния параметров проектной среды рассмотрены варианты реализации организационных проектов энергетической компании на основе ключевых показателей организационного развития, к которым относят человеческие ресурсы и капитал. Для оценки влияния ключевых факторов проектной среды на объем выполненных работ проекта был применен метод множественной регрессии. Уравнение регрессии позволяет количественно оценить влияние каждого фактора и прогнозировать объем работ при различных комбинациях параметров. Это является важным элементом проактивного управления, так как позволяет заранее оценить возможные изменения в проекте и разработать превентивные меры. Путем использования множест-

венной регрессии получают модель процесса, содержащую факторы X_p , коэффициенты уравнения регрессии k_p , которые влияют на выполнение объема работ проекта Y_m :

$$Y_m = k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3 + k_4 X_4 + k_5 X_5 + \epsilon, \quad (1)$$

где Y_m – объем выполненных работ проекта (зависимая переменная); X_1 – численность персонала; X_2 – количество отработанных дней; X_3 – производительность выполнения работ проекта за час; X_4 – средняя заработная плата; X_5 – интеллектуальный капитал; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коэффициенты регрессии, показывающие на сколько единиц изменится Y_m при изменении соответствующего фактора на единицу; ϵ – ошибка модели, отражающая влияние неучтенных факторов.

Данное уравнение позволяет прогнозировать объем работ при изменении ключевых факторов, что является важным инструментом проактивного управления. Например, если прогнозируется снижение производительности (X_3), можно заранее разработать меры по повышению мотивации сотрудников или оптимизации процессов. Таким образом, уравнение регрессии не только помогает прогно-

зировать результаты, но и служит основой для принятия превентивных решений, что соответствует принципам проактивного управления.

Ключевые факторы, влияющие на результаты деятельности с использованием проактивного подхода управления проектами организационного развития энергетической компании указаны в таблице 5. Также в качестве примера приведены расчеты для ряда значений, необходимые для демонстрации модели системы.

Для анализа данных использовался программный продукт SPSS, который позволил получить численные значения коэффициентов и оценить их значимость. Коэффициенты регрессии были рассчитаны с использованием метода наименьших квадратов на основе данных, собранных в ходе экспериментального исследования (табл. 6). Сценарный анализ верифицирован через экспертные оценки менеджеров энергетической компании, что обеспечило практическую релевантность сценариев. Благодаря расчетам можно оценить вклад каждого фактора в формирование объема выполненных работ проекта:

Таблица 4 – Ограничения модели управления проектом организационного развития на основе проактивного подхода к управлению в энергетической компании *

Ограничение	Описание
Зависимость от качества входных данных	Точность прогнозов напрямую связана с достоверностью и полнотой исходных данных. Например, некорректная оценка интеллектуального капитала или производительности может исказить результаты регрессии.
Сопrotивление в консервативных компаниях	Внедрение модели требует изменения управленческой культуры, что сложно реализовать в компаниях с жесткой иерархией и традиционными подходами как раз в компаниях энергетической отрасли.
Необходимость экспертных компетенций	Использование методов множественной регрессии и сценарного анализа подразумевает наличие квалифицированных аналитиков, что ограничивает применение в малых энергетических компаниях.
Ограниченная адаптивность к экстремальным рискам	Модель эффективна в условиях прогнозируемой неопределенности, но не учитывает форс-мажоры (например, глобальные кризисы, пандемии).

* составлено авторами

Таблица 5 – Ключевые факторы, влияющие на результаты проактивного подхода управления проектами организационного развития энергетической компании *

Вариант	Основные факторы, определяющие объем выполнения работ проекта					Объем работ (тыс. руб.)
	Численность персонала команды проекта (чел.)	Среднее количество дней, отработанных персоналом (дни)	Производительность выполнения работ проекта за час (ед./час)	Средняя заработная плата (руб.)	Активы (интеллектуальный капитал) проекта (руб.)	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y
1	20	4	35	7 000	9 000	420,00
2	19	5	30	8 000	9 500	465,40
3	16	6	25	9 000	7 462	401,47
4	15	6	24	9 500	10 500	464,17
5	14	7	26	10 000	8 234	458,04
6	12	8	30	12 000	8 000	525,81

* составлено авторами

Таблица 6 – Коэффициенты уравнения регрессии и их интерпретация *

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	ϵ
22,27	53,34	4,42	0,02	0,03	-788,50
Увеличение численности персонала на 1 человека приводит к увеличению объема работ на 22,27 единиц	Увеличение количества отработанных дней на 1 день приводит к увеличению объема работ на 53,34 единиц.	Увеличение производительности на 1 единицу приводит к увеличению объема работ на 4,42 единицы.	Увеличение заработной платы на 1 рубль приводит к увеличению объема работ на 0,02 единицы.	Увеличение интеллектуального капитала на 1 рубль приводит к увеличению объема работ на 0,03 единицы.	

* составлено авторами

В результате подстановки численных значений полученных коэффициентов в уравнение регрессии (1) формируется аналитическое выражение (2), предназначенное для определения прогнозируемых значений объема выполненных работ проекта (Y_m) при условии выбора удовлетворительной комбинации факторов целевого управления проектом:

$$Y_m = 22,27X_1 + 53,54X_2 + 4,42X_3 + 0,02X_4 + 0,03X_5 - 788,50 \quad (2)$$

Данное аналитическое выражение помогает проводить анализ различных вариантов прогнозируемых объемов работ проекта (Y_m) путем варьирования значений факторов X_1 , X_2 , X_3 , X_4 и X_5 , при этом принятие решения о выборе оптимального варианта осуществляется на основе соответствия полученных результатов общей стратегии управления проектом. Помимо построения регрессионной модели, на основе имеющихся данных проводится оценка взаимосвязи между рассматриваемыми факторами посредством

анализа дополнительных статистических показателей, в частности коэффициента корреляции между выбранными факторами.

Значение данного коэффициента, полученное в рамках проведенного исследования, равно единице, что свидетельствует о наличии полной линейной зависимости или полной корреляции между исследуемыми факторами.

Для оценки адекватности построенной регрессионной модели был рассчитан коэффициент детерминации R^2 (3) на основе данных (табл. 5-8):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{623,92}{9302,02} = 0,9329, \quad (3)$$

где SS_{res} – сумма квадратов остатков; SS_{tot} – общая сумма квадратов.

Полученный результат означает, что модель объясняет 93,29% вариации объема выполненных работ (Y_m), что свидетельствует о высокой объяснительной способности выбранных факторов.

Таблица 7 – Данные, необходимые для расчета коэффициента детерминации R^2 (сумма квадратов остатков) *

Вариант	Фактическое Y	Предсказанное Y	Остаток	Квадрат остатка
1	420,00	434,96	-14,96	223,80
2	465,40	478,93	-13,53	183,06
3	401,47	402,22	-0,75	0,56
4	464,17	476,67	-12,5	156,25
5	458,04	457,60	0,44	0,19
6	525,81	518,06	7,75	60,06
Σ				623,92

* составлено авторами

Таблица 8 – Данные, необходимые для расчета коэффициента детерминации R^2 (общая сумма квадратов) *

Вариант	Фактическое Y	Среднее Y	Отклонения каждого Y от среднего	Квадраты отклонений каждого Y от среднего
1	420,00	455,82	-35,82	1 283,07
2	465,40		9,58	91,78
3	401,47		-54,35	2 953,92
4	464,17		8,35	69,72
5	458,04		2,22	4,93
6	525,81		69,99	4 898,60
Σ	2 734,89			9 302,02

* составлено авторами

Таблица 9 – Результаты оценки сценариев влияния изменения показателей на объем выполненных работ в организационном проекте энергетической компании (составлено авторами)

Сценарий	Основные показатели расходования ресурсов, которые формируют объем работ проекта						Прогнозируемый объем работ проекта (тыс. руб.)
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y	
Базовый сценарий	16	6	25	9 000	7 462	401	400,17
Сокращение числа сотрудников	13	6	25	9 000	7 462	-	333,39
Увеличение числа сотрудников	19	6	25	9 000	7 462	-	466,95
Уменьшение количества дней	16	5	25	9 000	7 462	-	346,84
Увеличение количества дней	16	7	25	9 000	7 462	-	453,50
Увеличение производительности	16	6	27	9 000	7 462	-	413,40
Снижение производительности	16	6	22	9 000	7 462	-	391,35
Снижение заработной платы	16	6	25	8 000	7 462	-	376,17
Увеличение заработной платы	16	6	25	10 000	7 462	-	424,17
Увеличение интеллектуального капитала	16	6	25	9 000	7 600	-	403,69
Снижение интеллектуального капитала	16	6	25	9 000	7 300	-	396,04

Основные результаты оценки сценариев влияния изменений показателей на объем выполненных работ, полученные на основе анализа уравнения (2), представлены в таблице 9, чтобы наглядно оценить влияние каждого фактора на прогнозируемый результат.

Сценарий «Базовый сценарий» представляет со-

бой базовый сценарий с исходными значениями всех показателей и служит точкой отсчета для сравнения с другими сценариями.

Для оценки влияния изменений нескольких факторов одновременно на объем выполненных работ был проведен многофакторный анализ. Результаты анализа представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Результаты многофакторного анализа влияния изменения показателей на объем выполненных работ в организационном проекте энергетической компании *

Сценарий	Основные показатели расходования ресурсов, которые формируют объем работ проекта					Прогнозируемый объем работ проекта (тыс. руб.)	Комментарий
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅		
0. Базовый сценарий	16	6	25	9 000	7 462	400,17	Базовый сценарий для сравнения
1. Сокращение персонала и увеличение производительности	14	6	27	9 000	7 462	410,50	Снижение численности персонала компенсируется увеличением производительности
2. Увеличение дней и снижение заработной платы	16	7	25	8 500	7 462	440,20	Увеличение количества дней компенсирует снижение заработной платы
3. Увеличение интеллектуального капитала и снижение производительности	16	6	23	9 000	7 600	405,80	Увеличение интеллектуального капитала частично компенсирует снижение производительности
4. Снижение дней и увеличение заработной платы	16	5	25	9 500	7 462	380,50	Снижение количества дней частично компенсируется увеличением заработной платы
5. Увеличение всех факторов	18	7	27	9 500	7 600	520,00	Увеличение всех факторов приводит к значительному росту объема работ
6. Снижение всех факторов	14	5	23	8 500	7 300	350,00	Снижение всех факторов приводит к значительному уменьшению объема работ

* составлено авторами

Исходя из полученных результатов многофакторного анализа влияния изменения показателей на объем выполненных работ в организационном проекте энергетической компании по каждому сценарию можно сделать следующие выводы (табл. 11).

Кроме этого, одним из ключевых элементов проактивного подхода является идентификация потенциальных рисков на ранних этапах проекта. В рамках исследования были идентифицированы основные риски, которые могут повлиять на успешность проекта энергетической компании (табл. 12).

Для оценки рисков в рамках модели управления проектами организационного развития на основе проактивного подхода к управлению в энергетической компании используется метод сценарного анализа, который позволяет оценить вероятность и последствия каждого риска (табл. 13).

На основе оценки рисков разрабатываются превентивные меры, которые позволяют минимизировать их влияние на проект (табл. 14).

Рассмотрим пример использования модели для минимизации риска снижения производительности в таблице 15.

Таблица 11 – Выводы, сформированные на основе полученных результатов многофакторного анализа влияния изменения показателей на объем выполненных работ в организационном проекте энергетической компании *

Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
Снижение численности персонала на 2 человека (X ₁ =14) компенсируется увеличением производительности на 8,00% (X ₃ =27), что приводит к увеличению объема работ на 2,58% по сравнению с базовым сценарием.	Увеличение количества отработанных дней на 1 день (X ₂ =7) компенсирует снижение заработной платы на 5,56% (X ₄ =8500), что приводит к увеличению объема работ на 10,00% по сравнению с базовым сценарием.	Увеличение интеллектуального капитала на 1,85% (X ₅ =7600) частично компенсирует снижение производительности на 8,00% (X ₃ =23), что приводит к увеличению объема работ на 1,41% по сравнению с базовым сценарием.
Сценарий 4	Сценарий 5	Сценарий 6
Снижение количества отработанных дней на 1 день (X ₂ =5) частично компенсируется увеличением заработной платы на 5,56% (X ₄ =9500), что приводит к снижению объема работ на 4,91% по сравнению с базовым сценарием.	Одновременное увеличение всех факторов (X ₁ =18, X ₂ =7, X ₃ =27, X ₄ =9500, X ₅ =7600) приводит к увеличению объема работ на 29,95% по сравнению с базовым сценарием.	Одновременное снижение всех факторов (X ₁ =14, X ₂ =5, X ₃ =23, X ₄ =8500, X ₅ =7300) приводит к снижению объема работ на 12,54% по сравнению с базовым сценарием.

* составлено авторами

Таблица 12 – Основные риски, которые могут повлиять на успешность проекта энергетической компании *

Наименование риска	Описание
Операционные	Связаны с неэффективным использованием ресурсов, низкой производительностью или сбоями в рабочих процессах
Финансовые	Возникают из-за увеличения затрат, колебаний цен на ресурсы или изменения экономических условий
Технологические	Связаны с внедрением новых технологий, которые могут не оправдать ожиданий или привести к сбоям в работе
Внешние	Включают изменения законодательства, колебания спроса на энергию или непредвиденные события (например, природные катаклизмы)

* составлено авторами

Таблица 13 – Возможные сценарии при оценивании рисков *

Сценарий	Изменения	Последствия риска
Сценарий 1	Снижение производительности на 11,17%	Уменьшение объема работ на 4,42%
Сценарий 2	Увеличение заработной платы на 5,45%	Увеличению затрат на 0,12% от общего бюджета проекта
Сценарий 3	Снижение количества отработанных дней на 5,55%	Уменьшение объема работ на 2,67%

* составлено авторами

Таблица 14 – Возможные превентивные меры на основе оценки рисков, влияющие на успешность проекта энергетической компании *

Превентивная мера	Описание
Оптимизация использования ресурсов	Увеличение производительности за счет внедрения новых технологий или обучения сотрудников
Контроль затрат	Мониторинг расходов и поиск альтернативных источников ресурсов
Гибкое планирование	Разработка альтернативных сценариев развития проекта, которые позволяют быстро адаптироваться к изменениям внешней среды
Управление персоналом	Повышение мотивации сотрудников и оптимизация рабочих процессов для снижения риска снижения производительности

* составлено авторами

Таблица 15 – Пример использования модели на основе проактивного подхода для управления рисками проекта энергетической компании *

Этап	Описание
Идентификация риска	Прогнозируется снижение производительности (X_3) на 11,17% из-за устаревшего оборудования
Оценка риска	Снижение производительности на 11,17% приведет к уменьшению объема работ на 4,42%
Превентивные меры	1. Внедрение новых технологий для повышения производительности; 2. Обучение сотрудников для улучшения навыков работы с новым оборудованием; 3. Оптимизация рабочих процессов для снижения времени простоя

* составлено авторами

Обсуждение. Применение предложенной модели позволяет своевременно выявлять и минимизировать риски, что снижает вероятность возникновения проблем и повышает эффективность управления проектами. Например, в рамках экспериментального исследования на примере энергетической компании удалось снизить риск снижения производительности на 8,41% за счет внедрения превентивных мер. Важным аспектом анализа является оценка адекватности регрессионной модели. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9329$ подтверждает, что выбранные факторы (численность персонала, отработанные дни, производительность, заработная плата и интеллектуальный капитал) в совокупности объясняют 93,29% изменчивости объема работ. Это позволяет считать модель релевантной для прогнозирования в рамках исследуемой энергетической компании.

Результаты экспериментальных исследований на примере энергетической компании продемонстрировали, что предложенный способ проактивного управления позволяет эффективно прогнозировать изменения и предпринимать соответствующие меры. К примеру, одним из выводов, сформированном на основе полученных результатов многофакторного анализа влияния изменения показателей на объем выполненных работ в организационном проекте энергетической компании является, что что увеличение производительности (X_3) на 8,00% приводит к увеличению объема выполненных работ (Y_m) на 2,58%. Это означает что меры, соответствующие принципам проактивного управления по повышению

производительности необходимо планировать заранее.

Разработанная модель предусматривает ее использование в условиях неопределенности, характерных для энергетической отрасли. К таким условиям могут относиться: нестабильная внешнеполитическая обстановка, рост цен на энергоресурсы, технологические риски и т.п. В условиях неопределенности модель позволяет прогнозировать объем работ и разрабатывать соответствующие меры, направленные на минимизацию рисков.

Выводы. В заключение следует отметить, что разработанная модель системы проактивного управления проектами организационного развития демонстрирует высокую эффективность в условиях неопределенности. Результаты исследования показали, что на объем выполненных работ сильнее всего оказывают влияние два фактора: количество задействованных сотрудников и количество отработанных дней. При этом повышение производительности труда более эффективный способ, чем увеличение численности персонала.

Уникальность разработанной модели по сравнению с существующими подходами состоит в том, что она объединяет три метода: прогнозирования, сценарного анализа и множественной регрессии. Эта уникальность позволяет оцифровать данные проекта для последующего принятия решения с целью оптимизации и минимизации различного рода рисков.

Таким образом, проактивный подход является эффективным инструментом управления проектами

организационного развития, позволяющим заблаговременно выявлять и предотвращать потенциальные проблемы и риски. Разработанная модель управления проектами организационного развития на основе проактивного подхода, обеспечивает гибкость и адаптивность управления проектами в условиях неопределенности. Соответственно использование данной модели не ограничена лишь только энергетической отраслью, а также возможно ее использование в других отраслях промышленности с высокой степенью неопределенности.

Результаты применения модели на примере энергетической организации подтверждают ее практическую значимость и эффективность, демонстрируя возможность повышения результативности проектов за счет повышения производительности труда. Оперативный мониторинг и контроль являются неотъемлемыми компонентами проактивного управления, обеспечивающими своевременное получение актуальной информации о состоянии проекта и принятие корректирующих мер.

Внедрение модели системы проактивного управления проектами организационного развития в энергетических организациях, может способствовать повышению эффективности их деятельности, снижению рисков и достижению стратегических целей. Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование разработанной модели, ее адаптацию к различным типам проектов и отраслям, а также на разработку практических рекомендаций по ее внедрению и использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Graessler I., Oleff C., Preuß D. Proactive Management of Requirement Changes in the Development of Complex Technical Systems // Special Issue Requirements Engineering: Practice and Research, 2022. – Vol. 12, Issue 4. – P. 1874.
2. Li H., Xu Z., L. Xiong, Y. Liu. Robust proactive project scheduling model for the stochastic discrete time/cost trade-off problem // Discrete Dynamics in Nature and Society, 2015. – Vol. – P. 1-10.
3. Song W., Kang D., Zhang J., Xi H. Proactive project scheduling with time dependent workability uncertainty // Autonomous Agents and Multi Agent Systems Proceedings of the 16th Conference. Int. Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2017. – P. 221-229.
4. Ушаков Д.С. Классификация и описание современных подходов и методик управления проектами // Вестник Московской международной академии. – 2022. – №. 2. – С. 203-209.
5. Зотова Е.В. Проактивный подход к управлению инвестиционными проектами / Е.В. Зотова // Управление проектами и программами. – 2022. – № 4. – С. 280-287.
6. Леонов М.Е. Роль проактивного подхода в управлении государственными проектами и программами / М.Е. Леонов, А.Н. Фомичев // Роль бизнеса в трансформации общества – 2022: Сборник материалов XVII Международного научного конгресса, Москва, 11-15 апреля 2022 года. Москва: Московский финансово-промышленный университет «Синергия», 2022. – С. 205-208.
7. Суслов Е.Ю. Совершенствование проектного управления устойчивым развитием энергетической компании // Human Progress – 2024. – Т. 10. – №. 2.
8. Леонов М.Е. Модель реформирования структуры управления государственными программами Москвы / М.Е. Леонов // XXXIV Международные Плехановские чтения: сборник статей аспирантов и молодых ученых: материалы международной научно-практической конференции (Москва,

24-25 марта 2021 г.). – Москва: РЭУ имени Г.В. Плеханова, 2021. – С. 23-28.

9. Фомичев А.Н. Концепция векторного исследования сложных организационных систем / А.Н. Фомичев // Экономика, управление и общество: теория, методология и практика: материалы межвузовской очной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий: [сб. трудов] (Липецк, 5 октября 2021 г.) / под общ. ред. А.Д. Моисеева, М.А. Гуриной. Воронеж: НАУКА-ЮНИПРЕСС, 2021. – С. 311-324.

10. Smith P.G., Merritt G.M. Proactive risk management: Controlling uncertainty in product development. – productivity press, 2020. – 226 p.

11. Xu J., Cheung C., Manu P., Ejohwomu O., Too J. Implementing safety leading indicators in construction: Toward a proactive approach to safety management. Safety Science. – 2023. – Vol. 157. – P. 105929. Doi: 10.1016/j.ssci.2022.105929.

12. Dombrowski, M., Sachenko, A., Sachenko, O., Dombrowski, Z. Proactive Project Management as a Discrete Event System. In 2020 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS). – 2020. – P. 1-4.

13. Morozov V., Kalnichenko O., Proskurin M. Methods of proactive management of complex projects based on neural networks //2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). IEEE, 2019. – Т. 2. – P. 964-968.

14. Parekh R., Olivia M. Utilization of artificial intelligence in project management //International Journal of Science and Research Archive. – 2024. – Т. 13. – №. 1. – P. 1093-1102.

15. Старченко Г.В. Проактивное управление проектами инновационного развития национальной экономики // Colloquium-journal. Голопристанский горрайонный центр занятости, 2019. – №. 19 (43). – С. 134-136.

Статья поступила в редакцию 13.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.85

EDN: JHLWBK

МОНИТОРИНГ И АНАЛИЗ ПРОГРЕССА ОБУЧЕНИЯ В НЕЙРОСИМВОЛЬНЫХ АДАПТИВНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

© Авторы 2025

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)

Аннотация. В статье рассматриваются методы мониторинга и анализа прогресса обучения в нейросимвольных адаптивных образовательных системах. Предложены подходы к сбору, структурированию и визуализации данных о взаимодействии учащихся с мультимодальными образовательными материалами. Разработаны алгоритмы отслеживания прогресса с использованием персонализированного графа знаний и многомерных метрик успеваемости. Описаны методы интерпретации прогресса и формирования рекомендаций на основе интегративного анализа текстовых и визуальных данных. Представлены подходы к созданию персонализированных дашбордов прогресса, объединяющих различные показатели обучения в удобном формате. Экспериментальные результаты демонстрируют эффективность предложенных методов по сравнению с традиционными системами мониторинга, показывая улучшение в точности оценки прогресса, глубине аналитических выводов и удобстве представления информации для учащихся и преподавателей.

Ключевые слова: прогресс обучения, нейросимвольные системы, мультимодальные образовательные данные, визуализация прогресса, адаптивное обучение, персонализированный граф знаний, образовательная аналитика, дашборды прогресса.

MONITORING AND ANALYZING LEARNING PROGRESS IN NEUROSymbOLIC ADAPTIVE EDUCATIONAL SYSTEMS

© The Authors 2025

ZUPAROVA Valentina Vladimirovna, assistant of the Department «Programming»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)

Abstract. The article deals with methods of monitoring and analyzing learning progress in neurosymbolic adaptive educational systems. Approaches to collecting, structuring and visualizing data on students' interaction with multimodal educational materials are proposed. Algorithms for tracking progress using personalized knowledge graph and multi-dimensional performance metrics are developed. Methods for interpreting progress and generating recommendations based on integrative analysis of textual and visual data are described. Approaches for creating personalized progress dashboards that integrate various learning metrics in a convenient format are presented. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed methods compared to traditional monitoring systems, showing improvements in the accuracy of progress assessment, depth of analytical conclusions, and ease of presentation of information for students and teachers

Keywords: learning progress, neurosymbolic systems, multimodal educational data, progress visualization, adaptive learning, personalized knowledge graph, educational analytics, progress dashboards.

Для цитирования: Зупарова В.В. Мониторинг и анализ прогресса обучения в нейросимвольных адаптивных образовательных системах / В.В. Зупарова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 108-114. – EDN: JHLWBK.

Введение. Развитие адаптивных образовательных систем, основанных на нейросимвольных подходах, создает новые возможности для персонализации обучения и повышения его эффективности [1]. В предыдущем исследовании описана архитектура системы интегративного анализа мультимодальных образовательных данных, объединяющая большие языковые модели (LLM), алгоритмы компьютерного зрения и формальные графы знаний для комплексного анализа образовательного контента и адаптации траектории обучения (Е.И. Маркин, В.В. Зупарова, М.И. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы насто-

ящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69) – С. 40-51.). Однако для полноценного функционирования таких систем необходимы развитые методы мониторинга и анализа прогресса обучения, позволяющие отслеживать динамику усвоения знаний и эффективно корректировать образовательный процесс.

Существующие подходы к мониторингу прогресса, как правило, фокусируются на анализе текстовых ответов и результатов тестирования [2], игнорируя важные аспекты взаимодействия с мультимодальным контентом. Анализ недавних исследований показывает, что интегративный подход к мониторингу, учи-

тывающий различные модальности данных и использующий современные методы визуализации, может существенно повысить эффективность адаптивного обучения [3, 4]. Особый интерес представляет применение нейросимвольных методов для объединения количественных показателей успеваемости с семантическим анализом прогресса на основе графа знаний.

Данная статья развивает идеи, представленные в работе «Интегративный анализ мультимодальных образовательных данных на основе нейросетевых моделей и формальных графов знаний», и фокусируется на методах мониторинга и анализа прогресса обучения в нейросимвольных адаптивных системах (Е.И. Маркин, В.В. Зупарова, М.И. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69) – С. 40-51.). Основное внимание уделяется:

- 1) сбору и структурированию данных о прогрессе обучения с учетом мультимодальности;
- 2) расчету комплексных метрик прогресса;
- 3) визуализации данных о прогрессе в различных форматах;
- 4) интерпретации результатов и формированию персонализированных рекомендаций;
- 5) интеграции мониторинга прогресса с механизмами адаптации контента.

Методология. Предлагаемая методология мониторинга прогресса обучения основана на комплексном подходе к сбору и анализу данных о взаимодействии учащегося с образовательной системой. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на анализ правильности ответов, наш метод учитывает разнообразные аспекты обучения, включая взаимодействие с мультимодальным контентом, временные характеристики усвоения материала и эмоциональное состояние учащегося.

Типология данных о прогрессе обучения. Для эффективного мониторинга прогресса необходимо систематизировать типы собираемых данных. Выделяются следующие категории [5-7]:

1. Количественные показатели успеваемости:
 - правильность ответов на контрольные вопросы;
 - время выполнения заданий;
 - количество попыток до правильного решения;
 - баллы за выполнение проектов и практических работ.
2. Качественные характеристики взаимодействия:
 - паттерны навигации по учебным материалам;
 - последовательность изучения тем;
 - тип используемых образовательных ресурсов (текст, видео, интерактивные элементы);
 - предпочтения в форматах представления информации.
3. Мультимодальные данные:
 - взаимодействие с визуальными элементами (время просмотра изображений, внимание к отдельным элементам);
 - соотношение времени, уделяемого тексту и визуальным материалам;

– успешность решения заданий по различным модальностям.

4. Метакогнитивные показатели:

- самооценка уровня понимания материала;
- уверенность в ответах;
- осознание пробелов в знаниях;
- стратегии обучения и решения проблем.

Для сбора этих данных используется комбинация автоматизированных средств мониторинга, встроенных в образовательную платформу, и специальных инструментов самооценки. Автоматизированный сбор фиксирует объективные показатели взаимодействия, в то время как инструменты самооценки позволяют учесть субъективное восприятие учебного процесса самим учащимся.

Структура персонализированного графа прогресса. Центральным элементом системы мониторинга является персонализированный граф прогресса, представляющий собой расширение графа знаний, описанного в № 1(69) журнала «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс» в работе «Интегративный анализ мультимодальных образовательных данных на основе нейросетевых моделей и формальных графов знаний». Помимо стандартных элементов (концепты, отношения между ними), граф прогресса содержит дополнительные метаданные, отражающие динамику освоения материала (рис. 1).

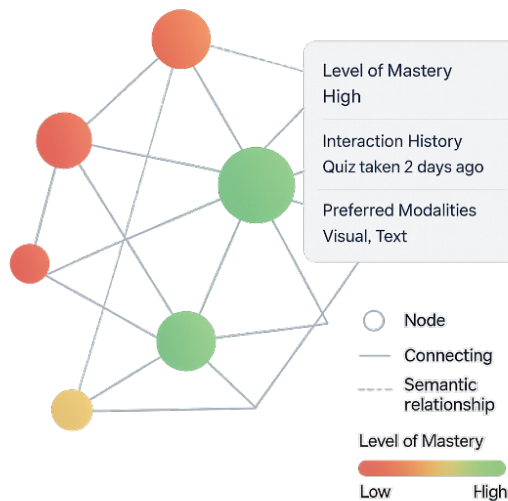


Рисунок 1 – Структура персонализированного графа прогресса. Узлы представляют концепты, цвет узлов отражает уровень освоения (от красного к зеленому), ребра – семантические связи между концептами. Дополнительные метаданные для каждого узла отображают историю взаимодействий, динамику усвоения и предпочтительные модальности восприятия

Каждый узел графа (концепт) содержит следующие метаданные:

- уровень освоения – вероятностная оценка в диапазоне [0, 1];
- история взаимодействий – последовательность действий учащегося, связанных с данным концептом;
- временная динамика – изменение уровня

освоения во времени;

- модальная эффективность – оценка эффективности усвоения концепта через различные модальности;

- связи с другими концептами – оценка понимания взаимосвязей между концептами.

Важной особенностью графа прогресса является его динамический характер: структура и метаданные узлов обновляются в режиме реального времени по мере взаимодействия учащегося с системой. Граф расширяется при изучении новых концептов и модифицируется при пересмотре и углублении знаний по уже изученным темам.

Методы сбора и структурирования данных о прогрессе. Для эффективного мониторинга прогресса обучения необходим систематический подход к сбору и структурированию разнородных данных [8, 9].

Основой мониторинга является сбор данных о всех значимых взаимодействиях учащегося с системой. Разработанный алгоритм классифицирует и структурирует эти взаимодействия, связывая их с соответствующими концептами в графе знаний.

Для каждого взаимодействия фиксируются:

- тип действия (просмотр материала, ответ на вопрос, выполнение задания);
- временные параметры (начало, продолжительность, завершение);
- контекст (тема, раздел, предшествующие действия);
- результат (правильность ответа, баллы, время выполнения);
- связанные концепты из графа знаний.

Особое внимание уделяется мультимодальным взаимодействиям, когда учащийся работает с материалами, содержащими различные типы контента. В этом случае дополнительно фиксируется распределение внимания между текстовыми и визуальными элементами, что позволяет оценить эффективность различных способов представления информации для конкретного учащегося.

Собранные данные структурируются в соответствии с разработанной таксономией образовательных действий, включающей следующие категории:

- ознакомление (первичное знакомство с концептом);
- изучение (углубленное рассмотрение);
- практика (применение знаний в заданиях);
- оценивание (контрольные мероприятия);
- повторение (возврат к изученному материалу);
- связывание (установление связей между концептами).

Такая категоризация позволяет анализировать не только количественные показатели успеваемости, но и качественные характеристики учебного процесса, включая стратегии обучения и паттерны взаимодействия с материалом.

Метрики и индикаторы прогресса обучения. На основе собранных данных рассчитывается комплекс метрик, отражающих различные аспекты прогресса

обучения [9, 10].

В отличие от традиционных подходов, где уровень освоения концепта выражается единой оценкой [11-13], в данном исследовании используется многомерная модель, учитывающая различные аспекты понимания:

- теоретическое понимание (T) – оценка знания определений, принципов, формулировок;
- практическое применение (P) – способность применять концепт в типовых задачах;
- творческое использование (C) – применение концепта в новых контекстах;
- взаимосвязи (R) – понимание связей с другими концептами.

Общий уровень освоения концепта (M) рассчитывается по формуле:

$$M = w_T \cdot T + w_P \cdot P + w_C \cdot C + w_R \cdot R$$

где w_T , w_P , w_C , w_R – весовые коэффициенты, адаптируемые в зависимости от специфики концепта и целей обучения.

Темпоральные метрики прогресса. Для оценки динамики обучения используются метрики, учитывающие временные аспекты:

- скорость освоения (V) – время, затраченное на достижение порогового уровня освоения;
- стабильность знаний (S) – устойчивость уровня освоения во времени;
- эффективность повторения (E) – прирост уровня освоения при повторном изучении.

Индикаторы мультимодальной эффективности. Важной составляющей мониторинга является оценка эффективности различных модальностей представления информации для конкретного учащегося:

- модальная предпочтительность (MP) – отношение времени, уделяемого различным типам контента;
- модальная эффективность (ME) – результативность обучения через различные модальности;
- индекс мультимодальной интеграции (MMI) – способность учащегося интегрировать информацию из разных модальностей.

Индекс мультимодальной интеграции вычисляется по формуле [14]:

$$MMI = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \cdot w_i}{\max(\sum_{i=1}^n M_i)}$$

где M_i – уровень освоения концепта через i -ю модальность, w_i – весовой коэффициент, отражающий сложность интеграции данной модальности.

Комплексные индикаторы прогресса. На основе базовых метрик формируются комплексные индикаторы, отражающие общий прогресс обучения:

- индекс прогресса по курсу (CPI) – интегральный показатель общего продвижения по программе;
- индекс глубины понимания (DUI) – оценка качественного уровня понимания материала;
- индекс развития компетенций (CDI) – оценка формирования целевых компетенций.

Для расчета индекса прогресса по курсу используется формула [15]:

$$CPI = \frac{\sum_{i=1}^k M_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^k w_i}$$

где M_i – уровень освоения i -го концепта, w_i – вес концепта в общей структуре курса, k – общее число концептов в курсе.

Подходы к визуализации прогресса обучения. Эффективная визуализация данных о прогрессе играет ключевую роль в обеспечении наглядности и интерпретируемости результатов мониторинга.

Основой визуального представления прогресса является интерактивная визуализация персонализированного графа знаний (рис. 2), где:

- узлы представляют концепты;
- размер узла отражает важность концепта в структуре курса;
- цвет узла показывает уровень освоения (от красного к зеленому);
- ребра отражают смысловые связи между концептами;
- толщина ребра показывает силу связи;
- интерактивные элементы позволяют получить детальную информацию о каждом концепте.

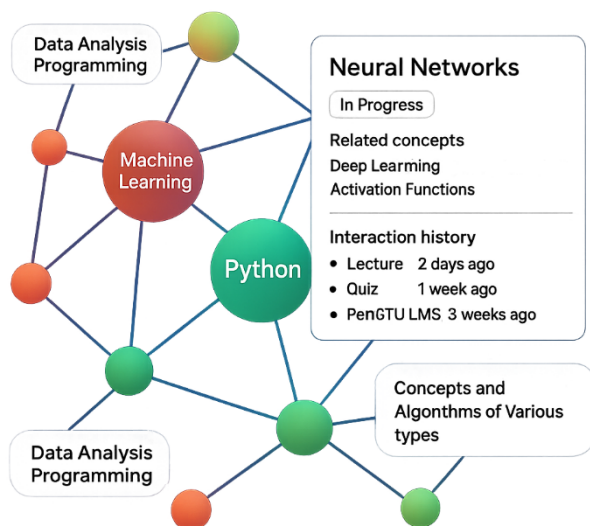


Рисунок 2 – Многомерная визуализация графа знаний. Каждый узел представляет концепт, размер узла отражает важность, цвет – уровень освоения. Интерактивные элементы позволяют увидеть детальную информацию о каждом концепте и его связях с другими элементами учебного материала

Темпоральная визуализация прогресса. Для отображения динамики обучения используются временные диаграммы нескольких типов:

1. Линейные графики – показывают изменение уровня освоения концептов во времени.
2. Тепловые карты активности – отображают интенсивность обучения в различные периоды.
3. Диаграммы Ганта прогресса – визуализируют последовательность освоения различных тем и время, затраченное на каждую тему.

Мультимодальные дашборды прогресса. Для

комплексного представления данных о прогрессе разработан концепт мультимодального дашборда (рис. 3), объединяющего различные визуализации и метрики в едином интерфейсе.

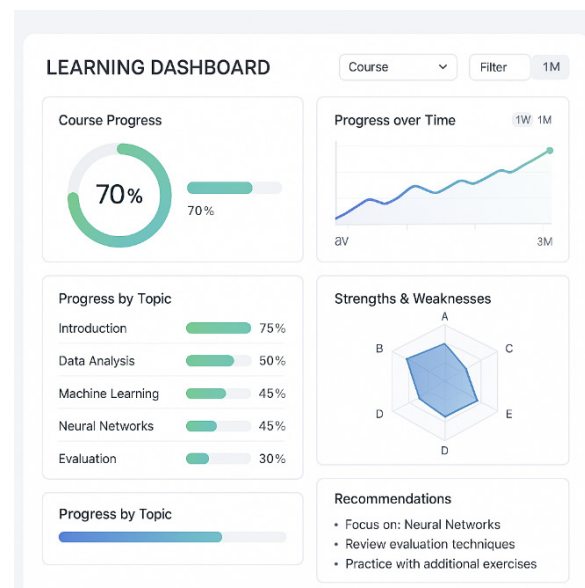


Рисунок 3 – Мультимодальный дашборд прогресса. Включает секции: общий прогресс по курсу, детализация по темам, временная динамика, сильные и слабые стороны, рекомендации. Интерактивные элементы позволяют переключаться между различными уровнями детализации и временными масштабами

Дашборд включает следующие секции:

1. Общий прогресс – интегральные показатели освоения курса.
2. Детализация по темам – углубленный анализ прогресса по отдельным разделам.
3. Временная динамика – изменение показателей во времени.
4. Сильные и слабые стороны – выявление областей, требующих особого внимания.
5. Персонализированные рекомендации – предложения по оптимизации обучения.

Важной особенностью дашборда является его адаптивность – представление данных корректируется в зависимости от текущего контекста обучения и потребностей пользователя (учащегося или преподавателя).

Алгоритмы интерпретации прогресса и формирования рекомендаций. Мониторинг прогресса не ограничивается сбором и визуализацией данных, но включает их интерпретацию и формирование персонализированных рекомендаций.

Для глубокого понимания индивидуальных особенностей учебного процесса разработан алгоритм выявления устойчивых паттернов обучения:

1. Временные паттерны – предпочтительное время и продолжительность занятий.
2. Последовательностные паттерны – типичные последовательности действий.
3. Модальные паттерны – предпочтения в способах представления информации.

4. Ресурсные паттерны – эффективность различных типов учебных материалов.

Для выявления паттернов используются методы машинного обучения (кластеризация, последовательностный анализ) и статистического анализа. Обнаруженные паттерны сопоставляются с эффективностью обучения, что позволяет выделить оптимальные стратегии для конкретного учащегося.

На основе анализа прогресса и выявленных паттернов формируются рекомендации нескольких типов:

1. Содержательные рекомендации – какие темы изучать, какие концепты повторить.
2. Методические рекомендации – как организовать процесс обучения.
3. Ресурсные рекомендации – какие учебные материалы использовать.
4. Темпоральные рекомендации – когда и как долго заниматься.

Пример алгоритма формирования рекомендаций:

1. Выявление областей, требующих внимания (концепты с низким уровнем освоения).
2. Анализ зависимостей в графе знаний (какие концепты необходимы для понимания проблемных).
3. Определение наиболее эффективных модальностей для данного учащегося.
4. Подбор учебных материалов, соответствующих предпочтительным модальностям.
5. Формирование временного плана с учетом выявленных временных паттернов.
6. Генерация персонализированных объяснений и примеров с использованием LLM.

Ключевым аспектом предлагаемого подхода является тесная интеграция системы мониторинга с механизмами адаптации образовательного контента, описанными в предыдущем исследовании (Е.И. Маркин, В.В. Зупарова, М.И. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69) – С. 40-51.).

Цикл "мониторинг-адаптация". Взаимодействие подсистемы мониторинга с механизмами адаптации организовано по принципу замкнутого цикла (рис. 4).

Цикл включает следующие этапы:

1. Сбор данных о взаимодействии учащегося с системой.
2. Обновление персонализированного графа прогресса.
3. Расчет и анализ метрик прогресса.
4. Выявление паттернов и формирование рекомендаций.
5. Передача рекомендаций в подсистему адаптации.
6. Генерация или модификация учебного контента.
7. Предоставление адаптированного материала учащемуся.

Важной особенностью системы является способность к самокоррекции стратегии мониторинга и адаптации на основе обратной связи от учащегося:

1. Явная обратная связь – прямые оценки полезности материалов и рекомендаций.
2. Неявная обратная связь – анализ поведения (время изучения, повторные обращения).
3. Коррекция метрик – адаптация весовых коэффициентов в формулах расчета метрик.
4. Обновление модели паттернов – уточнение выявленных паттернов обучения.

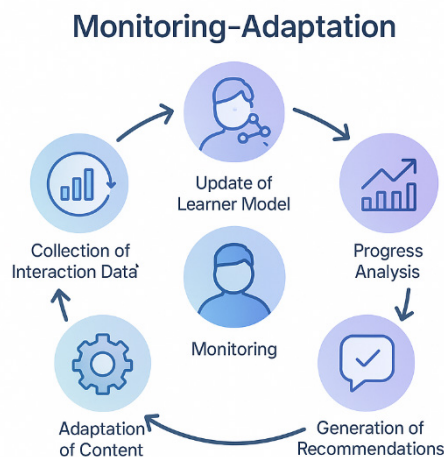


Рисунок 4 – Схема цикла "мониторинг-адаптация". Показаны компоненты: сбор данных о взаимодействии, обновление модели учащегося, анализ прогресса, формирование рекомендаций, адаптация контента, предоставление адаптированного материала. Стрелки демонстрируют циклический характер процесса с постоянной обратной связью

Результаты. Для оценки эффективности предложенных методов мониторинга и анализа прогресса обучения был проведен эксперимент в рамках онлайн-курса по программированию на базе Пензенского государственного технологического университета.

В эксперименте приняли участие 67 студентов, разделенных на контрольную (33 человека) и экспериментальную (34 человека) группы. Контрольная группа использовала традиционную систему мониторинга прогресса, основанную на тестовых оценках и простых визуализациях. Экспериментальная группа работала с разработанной системой интегративного мониторинга, включающей персонализированный граф прогресса, многомерные метрики и мультимодальные дашборды.

Сравнение точности оценки прогресса. Первый аспект исследования – оценка точности прогнозирования успешности завершения курса на основе данных мониторинга. Сравнивались прогнозы традиционной системы и разработанного подхода с фактическими результатами итогового тестирования (табл. 1).

Результаты показывают значительное повышение точности прогнозирования при использовании интегративного подхода к мониторингу прогресса. Особенно заметное улучшение наблюдается в определении студентов, которые могут столкнуться с

трудностями при завершении курса, что позволяет своевременно корректировать стратегию обучения.

Таблица 1 – Сравнение точности прогнозирования успешности завершения курса

Метрика	Традиционная система	Интегративный подход
Точность (Accuracy)	76.2%	89.7%
Полнота (Recall)	72.4%	87.3%
F1-мера	0.74	0.88
AUC	0.78	0.91

Влияние мониторинга на эффективность обучения. Второй аспект – оценка влияния различных подходов к мониторингу на итоговые результаты обучения. Сравнивались показатели контрольной и экспериментальной групп на основе итогового

тестирования, выполнения практических заданий и удержания знаний через 2 месяца после завершения курса (табл. 2).

Статистический анализ подтверждает значимость различий между группами ($p < 0.01$ для всех показателей). Наибольшее улучшение наблюдается в долгосрочном удержании знаний и субъективной удовлетворенности процессом обучения, что свидетельствует о положительном влиянии интегративного мониторинга на мотивацию и вовлеченность учащихся.

Оценка эффективности визуализаций. Третий аспект исследования – сравнение различных подходов к визуализации прогресса. С помощью методов *eye-tracking* и опросов оценивалась эффективность восприятия информации при использовании различных типов визуализаций (табл. 3).

Таблица 2 – Влияние системы мониторинга на результаты обучения

Показатель	Контрольная группа	Экспериментальная группа	Улучшение
Средний балл за итоговый тест	78.4/100	86.2/100	9.9%
Успешное выполнение практических заданий	72.6%	85.1%	17.2%
Удержание знаний через 2 месяца	64.8%	76.3%	17.7%
Субъективная удовлетворенность	7.2/10	8.6/10	19.4%

Таблица 3 – Сравнение эффективности различных подходов к визуализации прогресса

Тип визуализации	Время понимания (сек)	Точность интерпретации (%)	Субъективная понятность (1-10)
Табличное представление	42.3	76.4	6.2
Стандартные диаграммы	35.7	81.2	7.1
Граф знаний	28.4	87.5	8.3
Мультимодальный дашборд	24.1	92.3	8.8

Результаты подтверждают преимущество интерактивных визуализаций, особенно мультимодального дашборда, как с точки зрения объективных показателей (время понимания, точность интерпретации), так и с точки зрения субъективной оценки удобства.

Обсуждение. Результаты исследования подтверждают эффективность предложенного интегративного подхода к мониторингу и анализу прогресса обучения в нейросимвольных адаптивных системах.

Ключевым преимуществом разработанного подхода является комплексность оценки прогресса. В отличие от традиционных систем, фокусирующихся преимущественно на результатах тестирования, наш подход учитывает разнообразные аспекты обучения, включая взаимодействие с мультимодальным контентом, временные характеристики усвоения материала и метакогнитивные показатели. Это позволяет формировать более полную и точную картину прогресса, что подтверждается значительным повышением точности прогнозирования успешности завершения курса.

Важным аспектом является персонализация мониторинга, учитывающая индивидуальные особен-

ности учащихся. Выявление и учет персональных паттернов обучения позволяет формировать рекомендации, максимально соответствующие потребностям конкретного учащегося. Это особенно важно в контексте мультимодального обучения, где эффективность различных форматов представления информации может существенно различаться для разных учащихся.

Визуализация прогресса играет ключевую роль в эффективности предложенного подхода. Мультимодальные дашборды, объединяющие различные типы визуализаций в едином интерфейсе, позволяют учащимся быстро получать комплексное представление о своем прогрессе и принимать обоснованные решения о дальнейшей стратегии обучения. Интеграция визуализаций с персонализированным графом знаний обеспечивает не только количественную, но и качественную оценку прогресса, включая понимание взаимосвязей между концептами и выявление пробелов в знаниях.

Тесная интеграция мониторинга с механизмами адаптации контента, реализованная в нашем подходе, обеспечивает оперативную коррекцию образовательного процесса на основе выявленных

особенностей и потребностей учащегося. Замкнутый цикл "мониторинг-адаптация" позволяет системе постоянно улучшать свои рекомендации на основе обратной связи, что приводит к повышению эффективности обучения в долгосрочной перспективе.

Важно отметить, что предложенный подход не ограничивается технической реализацией, но учитывает и педагогические аспекты мониторинга прогресса. Многомерные метрики освоения концептов, отражающие различные аспекты понимания (теоретическое, практическое, творческое), позволяют формировать более глубокое представление о качестве усвоения материала, выходящее за рамки традиционной оценки правильности ответов.

Выводы. В данной работе представлен интегративный подход к мониторингу и анализу прогресса обучения в нейросимвольных адаптивных образовательных системах. Основные результаты исследования можно резюмировать следующим образом:

1) Разработана методология мониторинга прогресса, основанная на интеграции количественных показателей успеваемости с качественным анализом взаимодействия с мультимодальным контентом.

2) Предложена структура персонализированного графа прогресса, расширяющая концепцию графа знаний и позволяющая отслеживать динамику освоения материала с учетом различных аспектов понимания.

3) Разработан комплекс многомерных метрик прогресса, учитывающих теоретическое понимание, практическое применение, творческое использование и осознание взаимосвязей между концептами.

4) Предложены методы визуализации прогресса, включая интерактивные представления графа знаний и мультимодальные дашборды, объединяющие различные типы визуализаций в едином интерфейсе.

5) Разработаны алгоритмы интерпретации данных о прогрессе и формирования персонализированных рекомендаций на основе выявленных паттернов обучения.

6) Предложен механизм интеграции мониторинга прогресса с системой адаптации контента, обеспечивающий замкнутый цикл "мониторинг-адаптация" с постоянной обратной связью.

7) Экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода, показывающая значительное улучшение точности оценки прогресса, качества обучения и удовлетворенности учащихся по сравнению с традиционными методами.

Интегративный подход к мониторингу прогресса обучения, объединяющий нейросетевые методы обработки мультимодальных данных с формальными моделями представления знаний, открывает новые возможности для персонализации образовательного процесса и повышения его эффективности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке адаптивных образовательных систем нового поколения, обеспечивающих высокое качество

во обучения за счет точного отслеживания прогресса и оперативной адаптации учебного контента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Tamkin A. et al. Education in the Era of Neurosymbolic AI // arXiv preprint arXiv:2411.12763. – 2023.
2. Zhao F. et al. A Survey of Knowledge Tracing: Models, Variants, and Applications // arXiv preprint arXiv:2105.15106. – 2021.
3. Kasneci E. et al. Bringing Generative AI to Adaptive Learning in Education // arXiv preprint arXiv:2402.14601. – 2024.
4. Cooper K.M. et al. Modern Applications of AI in Education // Frontiers in Artificial Intelligence. – 2023. – Т. 6. – С. 1155708.
5. Bennane A. Adaptive Educational Software by Applying Reinforcement Learning // Informatics in Education. – 2013. – Т. 12. – №. 1. – С. 13-27.
6. Lin Y. et al. A systematic literature review of knowledge graph construction and application in education // Frontiers in Psychology. – 2022. – Т. 13. – С. 1035793.
7. Ji Z. et al. Survey of Hallucination in Natural Language Generation // ACM Computing Surveys. – 2023. – Т. 55. – №. 12. – С. 1-38.
8. Hoppe H.U. et al. A generative approach to the design of multimodal learning analytics // Journal of Learning Analytics. – 2018. – Т. 5. – №. 3. – С. 127-142.
9. Cooper K.M. et al. Modern Applications of AI in Education // Frontiers in Artificial Intelligence. – 2023. – Т. 6. – С. 1155708.
10. Corbett A.T., Anderson J.R. Knowledge Tracing: Modeling the Acquisition of Procedural Knowledge // User Modeling and User-Adapted Interaction. – 1995. – Т. 4. – №. 4. – С. 253-278.
11. Piech C. et al. Deep Knowledge Tracing // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2015. – Т. 28. – С. 505-513.
12. Baughman M. et al. Improving teacher efficiency with AI-generated personalized formative assessments // IBM Journal of Research and Development. – 2023. – Т. 67. – №. 1/2. – С. 27-32.
13. Hoppe H.U. et al. A generative approach to the design of multimodal learning analytics // Journal of Learning Analytics. – 2018. – Т. 5. – №. 3. – С. 127-142.
14. Worsley M. et al. Multimodal Data Fusion in Learning Analytics: A Systematic Review // Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 23. – С. 6856.
15. Baughman M. et al. Improving teacher efficiency with AI-generated personalized formative assessments // IBM Journal of Research and Development. – 2023. – Т. 67. – №. 1/2. – С. 27-32.

Статья поступила в редакцию 07.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.032:316.472.4

EDN: CNESTZ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ВЫСКАЗЫВАНИЙ ПО СОДЕРЖАТЕЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9329-0433

AuthorID: 1192795

ORCID: 0009-0005-2978-4659

ResearcherID: LWK-3508-2024

ЛОСЬ Михаил Александрович, аспирант, ассистент кафедры цифровых технологий

Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: Mihail12442@yandex.ru)

Аннотация. С ростом объема пользовательского контента в социальных сетях возникает проблема параллельного увеличения количества деструктивных комментариев, затрудняющих автоматическую модерацию и негативно влияющих на цифровую среду. Однако, существующие модели анализа тональности текста, как правило, не учитывают содержательную направленность высказываний, зачастую ограничиваясь эмоциональной оценкой. В данной работе были представлены подходы к концептуальному проектированию модели архитектуры нейронной сети, способной классифицировать пользовательские высказывания в социальных сетях по их прагматической функции – конструктивной, деструктивной или нейтральной. Был проведён обзор существующих программных решений, выявлены их ограничения, предложена типология высказываний и структура словаря, отражающая семантические, стилистические и прагматические особенности лексем. Разработана архитектура модели на базе *BiLSTM* с возможностью выбора способа векторизации текста. Определены форматы представления входных и выходных данных, а также принципы формирования обучающего корпуса с ручной лингвистической аннотацией. Исследование носит концептуальный характер и служит основой для дальнейшей реализации интеллектуальной системы анализа речевого поведения. В перспективе планируется апробация модели на пользовательских комментариях из регионов Сибири ресурсного типа: ХМАО, Кемеровская область-Кузбасс, Республика Хакасия и Республика Тыва.

Ключевые слова: проектирование нейронной сети, типологизация высказываний, конструктивность, деструктивность, анализ пользовательских комментариев, социальные сети, цифровая коммуникация, лексико-прагматический анализ, словарь лексических единиц, автоматическая классификация текста.

DESIGNING THE ARCHITECTURE OF A NEURAL NETWORK MODEL FOR CLASSIFICATION OF USER STATEMENTS BY CONTENT ORIENTATION

© Author(s) 2025

LOS Mikhail Aleksandrovich, postgraduate student, assistant of the Department of Digital Technologies

Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya St., 6, e-mail: Mihail12442@yandex.ru)

Abstract. With the growth of user content in social networks, the problem of a parallel increase in the number of destructive comments arises, complicating automatic moderation and negatively affecting the digital environment. However, existing models of text sentiment analysis, as a rule, do not take into account the substantive focus of statements, limiting themselves to an emotional assessment. This paper presents approaches to modeling the architecture of a neural network capable of classifying user statements in social networks by their pragmatic function – constructive, destructive or neutral. A review of existing software solutions was conducted, their limitations were identified, a typology of statements and a dictionary structure reflecting the semantic, stylistic and pragmatic features of lexemes were proposed. The architecture of the model based on *BiLSTM* with the ability to select a text vectorization method was developed. The formats for representing input and output data, as well as the principles of forming a training corpus with manual linguistic annotation were determined. The study is conceptual in nature and serves as a basis for further implementation of an intelligent speech behavior analysis system. In the future, it is planned to test the model on user comments from resource-type regions of Siberia: Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug, Kemerovo Region-Kuzbass, the Republic of Khakassia and the Republic of Tyva.

Keywords: neural network modeling, typology of statements, constructiveness, destructiveness, analysis of user comments, social networks, digital communication, lexical-pragmatic analysis, dictionary of lexical units, automatic text classification.

Для цитирования: Лось М.А. Проектирование архитектуры нейросетевой модели для классификации пользовательских высказываний по содержательной направленности / М.А. Лось // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 115-123. – EDN: CNESTZ.

Введение. С развитием цифровых технологий и ростом популярности социальных сетей, наблюдается стремительное увеличение числа пользователей, самих сетевых сообществ и объема генерируемого контента. По данным сервиса *DataReportal*, ответственного за аналитику мирового цифрового пространства, на 2024 год около 106 миллионов россиян использовали социальные сети, что составляет 73,5% от общего населения Российской Федерации [6]. Такой большой объем аудитории приводит к ежедневному появлению огромного количества пользовательских комментариев и публикаций. Однако, наряду с ростом объема публикуемого контента, увеличивается и количество деструктивных публикаций и комментариев, выражающиеся в агрессивном, провокационном и манипулятивном поведении со стороны пользователей. С 1 февраля 2021 на территории Российской Федерации вступил в силу Федеральный закон, согласно которому социальные сети должны удалять или блокировать любой контент, содержащий ненормативную лексику или материалы, пропагандирующие порнографию, культы насилия и жестокость [16]. Несмотря на введенные ограничения, пользователи научились обходить эти запреты, заменяя прямое упоминание ненормативной лексики и деструктивных материалов на сленговые выражения, сарказм, фонетические замены, мемы и вставки на других языках, что затрудняет работу автоматизированных алгоритмов фильтрации контента в социальных сетях. Ограничение заключается в том, что существующие модели анализа тональности текста часто сосредоточены на определении эмоциональной окраски сообщений (позитивной, негативной или нейтральной), не учитывая их конструктивность или деструктивность. Это обуславливает необходимость создания более точных инструментов для автоматизированного анализа и классификации пользовательских высказываний с учетом их смысловой направленности. Решение данной проблемы имеет важное значение для оптимизации систем модерации контента, обеспечения защиты пользователей от онлайн-агрессии и формирования более безопасной цифровой среды.

В последнее время исследуемая проблема активно обсуждается в научном сообществе. Так, исследование [19] посвящено выделению и описанию агрессивных интернет-типажей (таких как тролль, хейтер, кибербуллер и др.) как кросс-культурного феномена. На основе анализа онлайн-текстов автор показывает, что агрессивное поведение в сети принимает устойчивые формы с характерными коммуникативными стратегиями и намерениями, обусловленными анонимностью и спецификой интернет-среды. В другом исследовании [4] был проведен сравнительный анализ проявлений цифрового этикета в русскоязычных и англоязычных медиатекстах, посвященных миграционной тематике. На основе лингвистического и сентимент-анализа сообщений из социальных сетей установлено, что в русскоязычных источниках тональность варьируется от нейтральной до позитивной, тогда как в англоязыч-

ных – чаще встречается негатив. Работа подчеркивает важность этических норм онлайн-коммуникации и необходимость разработки механизмов противодействия стереотипам и интолерантности в цифровой среде. Еще одна работа [23] направлена на решение задачи классификации публикаций в социальных сетях с целью выявления положительного отношения пользователей. В отличие от традиционного анализа тональности текста, авторы предлагают использовать метаданные сообщений, такие как количество реакций, репостов и комментариев, для построения модели на основе алгоритма случайного леса. Данный подход позволяет эффективно решать задачу без необходимости проведения глубокого текстового анализа, что упрощает процесс и обеспечивает приемлемую точность классификации.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена увеличением объема пользовательского контента в социальных сетях и недостаточной эффективностью существующих моделей анализа тональности, которые не учитывают конструктивность или деструктивность высказываний пользователей в медиапространстве. Практическая значимость исследования заключается в разработке модели нейронной сети, которая может быть интегрирована в платформы мониторинга социальных сетей, информационные сервисы и системы цифровой модерации. Научная новизна исследования заключается в разработке и обосновании новой методики классификации пользовательских комментариев, а также в создании корпуса и словаря, основанных на содержательных характеристиках конструктивности и деструктивности в цифровом дискурсе.

Методология. Целью исследования являлась разработка архитектурной модели нейронной сети для автоматической классификации пользовательских высказываний в социальных сетях на основе их конструктивности и деструктивности. Ключевой особенностью предлагаемой модели является анализ лексико-семантических и прагматических составляющих текстового контента ориентированной тематики.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы к анализу тональности и содержания пользовательских комментариев.
2. Обосновать необходимость перехода от эмоционального анализа к содержательной типологизации высказываний.
3. Разработать концептуальную структуру словаря, отражающего типологию конструктивной и деструктивной лексики.
4. Разработать архитектуру нейронной сети, предназначенную для решения задачи классификации по содержательной направленности.
5. Определить возможные форматы представления входных и выходных данных, а также принципы построения обучающего корпуса.

Объектом исследования являлись пользователь-

ские комментарии, публикуемые в социальных сетях. Предметом исследования являлись лексико-семантические и прагматические характеристики пользовательских высказываний, определяющие их конструктивную или деструктивную направленность, а также теоретические и методологические основы проектирования нейросетевых архитектур, предназначенных для их автоматической классификации.

В рамках исследования были применены методы контент-анализа пользовательских сообщений, лексико-семантического и прагматического анализа речевых актов, а также понятийного моделирования при описании структуры словаря и архитектуры нейронной сети. На этапе теоретического моделирования использовались принципы построения современных нейросетевых архитектур, таких как *BiLSTM* и *Transformer*, адаптированные к специфике поставленных задач. Настоящее исследование носит прогностический характер, целью которого является обоснование теоретических и методологических основ для разработки будущей модели. Полученные результаты создадут фундаментальную базу для дальнейших прикладных и экспериментальных исследований.

В основу предлагаемой методики классификации положен лингвистический (социально ориентированный) подход, предусматривающий типологизацию пользовательских высказываний в соответствии с их содержательной направленностью (несколько этапов верификации, включая ручную проверку данных). Методика предполагает аннотирование текстов с применением специализированного лексического словаря. Каждая лексическая единица в словаре соотнесена с одной из трёх функциональных категорий: конструктивной, деструктивной или нейтральной. К конструктивным отнесены высказывания, направленные на оказание поддержки, предложение решений, логическое уточнение или аргументацию. Деструктивные высказывания содержат признаки обесценивания, агрессии, ироничной критики, провокации. Нейтральные высказывания представляют собой констатацию фактов или содержат общие рассуждения без явного коммуникативного намерения. Эта методика лежит в основе формирования обучающего корпуса и дальнейшей классификации высказываний с использованием архитектуры нейросети *BiLSTM*, адаптированной к распознаванию прагматических характеристик текстов.

Результаты. 1. Анализ существующих подходов к анализу тональности и содержания пользовательских комментариев. В настоящее время существует несколько подходов к анализу тональности пользовательских комментариев. К ним относятся классические методы машинного обучения, а также современные трансформерные модели, такие как *BERT* и *RoBERTa*. Классические методы машинного обучения включают в себя использование алгоритмов, таких как наивный байесовский классификатор, метод опорных векторов (*SVM*) и логистическая регрессия. Эти методы, предполагают предварительную обработку дан-

ных, которая включает в себя преобразование текста в вектор признаков с использованием таких подходов, как «мешок слов» или *TF-IDF* метрики, оценивающей важность слова в контексте одного документа или набора документов [25]. Несмотря на простоту и доступность для понимания, данные методы часто не учитывают контекст и многозначность слов, что снижает их эффективность при анализе сложных текстов. Модели на основе трансформеров, такие как *BERT* (англ. *Bi-directional Encoder Representations from Transformers*) и его улучшенная версия *RoBERTa* (англ. *Robustly Optimized BERT Approach*), являются значительным достижением в области обработки естественного языка после методов, представленных выше. *BERT* обучается на задаче моделирования языка с использованием маскирования и предсказания следующего предложения, что позволяет ему учитывать контекст как слева, так и справа от слова. *RoBERTa* оптимизирует процесс обучения *BERT*, исключая задачу предсказания следующего предложения, увеличивая объем и продолжительность обучения, что приводит к повышению производительности модели. Исследования в данной области демонстрируют, что *RoBERTa* превосходит *BERT* в задачах анализа тональности, особенно при работе с текстами, содержащими разнообразные семантические элементы и контекстную информацию [12].

Для более наглядного отображения особенностей представленных алгоритмов и подходов, в таблице 1 представлена сравнительная характеристика некоторых моделей анализа тональности.

Главный недостаток рассматриваемых моделей, в контексте решаемой исследовательской проблемы, заключается в том, что они ориентированы на определение полярности (позитивной, негативной, нейтральной) и не способны различать конструктивную критику и деструктивные высказывания. Данные характеристики способны существенно расширить возможности гибридных в частности социологических исследований в сочетании с потенциалом цифровой аналитической среды. Кроме того, такие эмоционально окрашенные явления, как сарказм и ирония в коммуникации пользователей, представляют собой значительные трудности для точного анализа тональности [24]. При рассмотрении научных работ, представленных ранее, можно сделать вывод, что применение анализа тональности в социальных и политических исследованиях широко распространено. Однако, для более глубокого понимания общественных настроений требуется учитывать не только эмоциональную окраску, но и конструктивность высказываний, что подчеркивает необходимость разработки более продвинутых моделей анализа.

2. Обоснование необходимости перехода от эмоционального анализа к содержательной типологизации высказываний. Проведенный обзор современных научных публикаций и прикладных разработок в сфере анализа текстов выявил, что

большинство существующих моделей ограничиваются обработкой лишь эмоциональной составляющей сообщения, не учитывая его прагматические функции и воздействие на аудиторию. Однако, в социальных сетях значительная доля пользовательских высказываний может быть нейтральной по тону, но одновременно – деструктивной по содержанию (например, с элементами иронии, сарказма, обесценивания, манипулятивных конструкций), либо наоборот – эмоционально окрашенной, но конструктивной по цели [18]. Таким образом,

основная идея предлагаемого подхода заключается в смещении акцента анализа с эмоциональной оценки на содержательную типологизацию. Данная типологизация основывается не только на семантической интерпретации лексических единиц, но и на прагматическом анализе контекста высказывания, т.е. на том, какую коммуникативную цель оно выполняет [22].

Для демонстрации различий между sentiment-анализом и содержательной типологией представлена сравнительная таблица (табл. 2).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика моделей анализа тональности текста

Наименование модели	Используемая архитектура	Потенциальные достоинства	Потенциальные недостатки
Наивный байесовский классификатор	Простая вероятностная модель, использующая теорему Байеса для классификации текстов.	- простота реализации и применения; - высокое качество работы на небольших наборах данных.	- игнорирование порядка слов; - слабый учет контекста; - низкая точность при сложных зависимостях между словами.
SVM	Алгоритм, создающий оптимальную гиперплоскость для разделения классов в пространстве признаков.	Эффективность при анализе текста с множеством признаков.	- требование тщательного подбора параметров; - слабый учет контекста.
BERT	Модель на основе трансформеров, обученная учитывать контекст слова с обеих сторон в предложении.	- понимание двунаправленного контекста слов в текстах; - высокое качество обработки естественного языка.	- высокая вычислительная сложность; - требование больших объемов обучающих данных.
RoBERTa	Улучшенная версия BERT с оптимизированным процессом обучения и использованием большего объема данных.	- улучшенная производительность по сравнению с BERT; - более эффективное обучение.	Более высокая потребность в вычислительной мощности и обучающих данных, чем в BERT.

Таблица 2 – Сравнение sentiment-анализа и содержательной типологизации высказываний

Критерий сравнения	Сентимент-анализ	Содержательная типологизация
Цель анализа	Определить эмоциональную окраску высказывания	Определить прагматическую функцию высказывания
Присваиваемые классы	– Позитивный; – негативный; – нейтральный	– Конструктивный; – деструктивный; – нейтральный
Ориентир при классификации	Лексическая полярность	– Семантика; – прагматика; – коммуникативная цель
Учет контекста	Частичный (пример – модели BERT)	Обязательный (особенно для деструктивных высказываний)
Примеры анализируемых высказываний	– «Отлично!» (позитивный); – «Ужасно!» (негативный)	– «Молодец, пояснил по сути.» (конструктивный); – «Ты как всегда врешь!» (деструктивный)
Перспективная область применения	– Маркетинг; – опросы; – медиаполитика	– Модерация контента; – цифровая лингвистика; – безопасность среды

В данной таблице проведено сопоставление двух методологических подходов к анализу пользовательского контента в цифровой среде: традиционного метода сентимент-анализа и предлагаемого в исследовании метода содержательной типологизации. Выбор критериев для сравнительного анализа обусловлен необходимостью формализации методологических, инструментальных и прикладных различий между подходами, которые имеют схожие внешние цели, такие как автоматическая обработка и классификация текстовых данных.

Первым критерием является определение цели анализа, поскольку этот аспект определяет, какие характеристики текста подлежат выделению и интерпретации. Сентимент-анализ направлен на выявление эмоциональной окраски, тогда как

содержательная типологизация фокусируется на прагматической функции, то есть на том, как высказывание воздействует на адресата и выполняет коммуникативную задачу. Вторым критерий – аннотация классов показывает принципиальное различие между эмоциональными и функциональными категориями. Традиционные классы сентимент-анализа не позволяют зафиксировать случаи скрытой агрессии, манипуляции или конструктивного предложения, что восполняется введением классов в содержательной типологизации [4]. Третий критерий – ориентиры при классификации иллюстрирует различие в опоре на признаки. В сентимент-анализе основным критерием выступает лексическая полярность, тогда как при содержательной классификации определяющими факторами являются семантика, прагматика

и коммуникативные интенции автора высказывания [14]. Отдельное внимание уделено учёту контекста. Современные модели sentiment-анализа, включая на *BERT*, учитывают контекст лишь частично. В типологической классификации контекст приобретает критическое значение, особенно при идентификации деструктивных форм коммуникации, которые могут быть замаскированы под иронию или нейтральные формулировки [11]. Пятый критерий – примеры высказываний служит для демонстрации различий на уровне интерпретации текста. Выражения с явной эмоционально-оценочной коннотацией подходят для sentiment-анализа, однако они оказываются неэффективными при классификации высказываний, не обладающих эмоциональным оттенком, но содержащих элементы агрессивного содержания. Наконец, перспективная область применения подчёркивает, что sentiment-анализ используется преимущественно в коммерческих и маркетинговых задачах, тогда как содержательная типологизация востребована в таких прикладных направлениях, как автоматическая модерация, цифровая лингвистика и обеспечение безопасности цифрового пространства.

3. Разработка концептуальной структуры словаря, отражающего типологию конструктивной и деструктивной лексики. В рамках решения данной задачи была разработана концептуальная модель формирования лексического словаря, отражающего типологическую классификацию пользовательских высказываний в социальных сетях. В отличие от универсальных словарей для sentiment-анализа, предлагаемый вариант словаря акцентирует внимание на содержательной направленности текста, учитывая прагматическую функцию речевых актов, которая может быть классифицирована как

конструктивная, деструктивная или нейтральная. Концептуальная модель процесса формирования лексикографического словаря, разработанная в свободной нотации, представлена на рисунке 1.

Процесс начинается с преобразования неструктурированных текстовых данных, полученных из пользовательских комментариев в социальных сетях, которые служат в качестве входных данных для системы. Далее аналитик данных проводит предобработку текстового материала. Она включает в себя удаление несущественных символов, гиперссылок и форматирование текста. После этого текст подвергается токенизации и лемматизации [5]. После получения лексем они подвергаются процедуре сопоставления с предварительно размеченным словарным массивом, если таковой уже существует. В противном случае осуществляется переход к этапу ручной или автоматической аннотации токенов. В процессе аннотации привлекается эксперт-лингвист, который проводит семантический, стилистический и прагматический анализ. Каждый лексический элемент (токен) классифицируется на основе его содержательной направленности, затем ему присваивается соответствующий тег: конструктивный, деструктивный или нейтральный. На основании аннотированных токенов создаются лексические единицы, содержащие полный набор информации: исходный токен, лемму, тег, контекст и, при необходимости, пояснение. Финальная стадия включает систематизацию всех лексических единиц в виде таблицы словаря, которая будет использоваться в дальнейшем для обучения нейронной модели. Подробная структура формируемого словаря, включающая наименования полей и их описания, представлена в таблице 3.

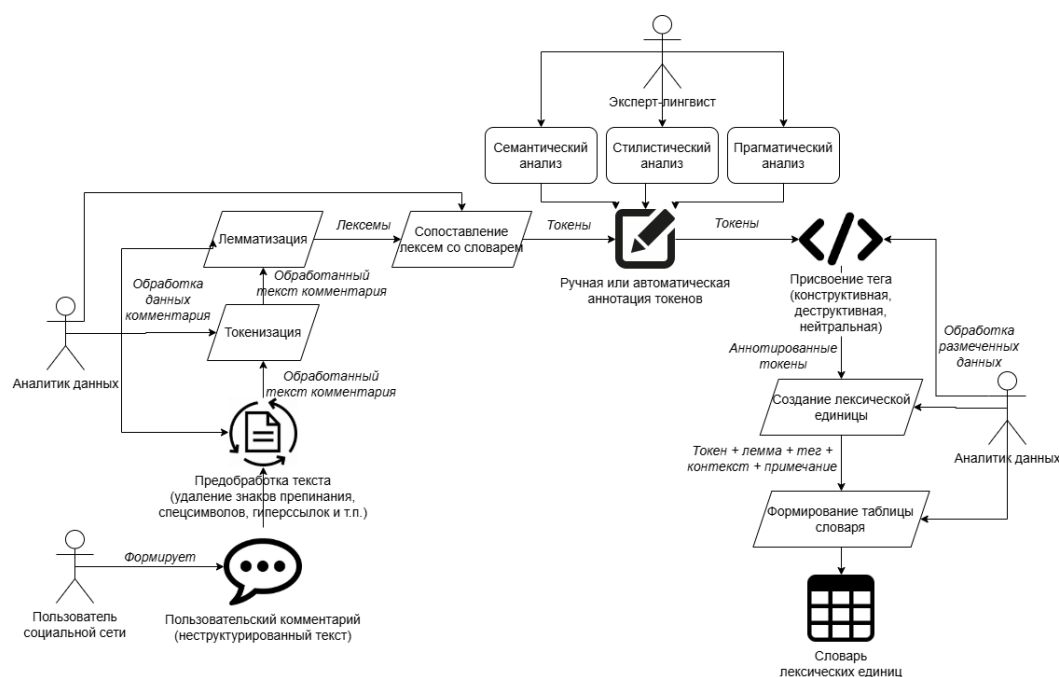


Рисунок 1 – Концептуальная модель обработки пользовательских комментариев для построения словаря лексических единиц

Таблица 3 – Структура словаря лексических единиц

Наименование поля	Назначение поля
Токен	Конкретная словоформа, извлеченная из комментария
Лемма	Начальная форма слова
Тег (категория)	Содержательная направленность: конструктивная / деструктивная / нейтральная
Контекст	Фрагмент текста, в котором лексема используется
Примечание	Дополнительные комментарии о стилистике, функции, вариантах употребления

4. Разработка архитектуры нейронной сети, предназначенной для решения задачи классификации по содержательной направленности. Разработанная концептуальная архитектура нейронной сети ориентирована на автоматическую типологизацию пользовательских высказываний по признаку конструктивности, деструктивности или нейтральности. Она учитывает специфику интернет-коммуникации и опирается на необходимость обработки коротких, неформальных, контекстуально нагруженных текстов.

На рисунке 2 представлена предложенная структура нейронной сети.

Входными данными для модели является последовательность токенов, извлеченная из пользовательского комментария. Токены поступают во входной слой нейронной сети, после которого следует *Embedding*-слой, осуществляющий преобразование каждого слова в плотное векторное представление. На данном этапе рассматриваются различные подходы к реализации: использование предварительно обученных статических векторных представлений слов (*Word2Vec* или *GloVe*) или контекстуальных представлений, генерируемых моделью *BERT* [9, 8].

отражена в схеме с помощью пунктирных линий, и будет зависеть от целей последующей реализации, необходимой точности и доступных вычислительных ресурсов. После предварительной векторизации данных, они подвергаются обработке посредством двунаправленного рекуррентного слоя (*BiLSTM*), который обеспечивает анализ контекста как слева, так и справа от каждого токена [3]. Это важно при выявлении неочевидных форм агрессии, иронии или речевого давления. Выходные данные *BiLSTM*-представления поступают в слой агрегации, известный как *Global Average Pooling* [7]. Этот слой выполняет операцию свертки последовательности в фиксированный по размеру вектор, агрегируя информацию по всей последовательности. На следующем этапе применяется полносвязный слой, в котором используется функция активации *ReLU* [21]. Данный слой осуществляет извлечение высокоуровневых признаков и передает их в выходной слой, оснащенный функцией активации *Softmax*, который осуществляет классификацию входного сигнала по трем категориям: конструктивный, деструктивный и нейтральный типы высказываний [20]. Окончательное решение принимается на основе наибольшего значения вероятности.

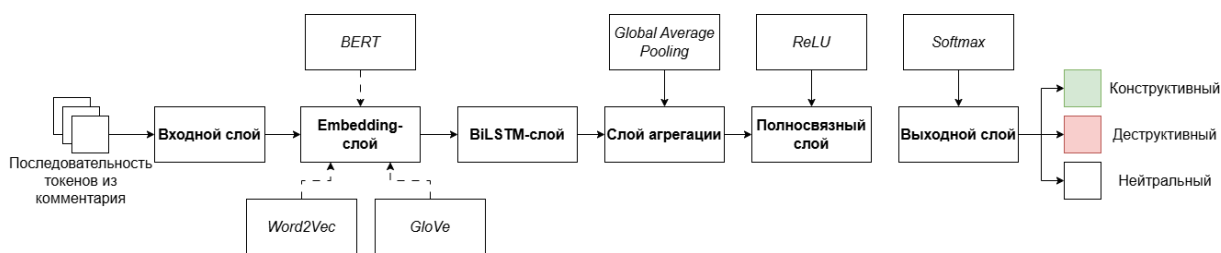


Рисунок 2 – Архитектура предлагаемой нейронной сети *BiLSTM* с альтернативными вариантами векторизации текста

5. Определение возможных форматов представления входных и выходных данных, а также принципов построения обучающего корпуса. Входные данные генерируются на основе пользовательских комментариев, извлеченных из социальной сети. На первоначальном этапе осуществляется предварительная обработка текстовой информации, которая включает в себя токенизацию, то есть разбиение текста на отдельные лексические единицы, а также лемматизацию – процесс приведения слов к их начальной словарной форме. После этого каждое слово преобразуется в вектор признаков, представляющий собой совокупность числовых значений, отражающих семантическое содержание

и контекстуальные характеристики данного слова. На этом этапе используется либо контекстуальное векторное представление с помощью предобученной модели *BERT*, которое учитывает, как слово ведёт себя в конкретном контексте, либо статическое представление через *Word2Vec* или *GloVe*, где каждому слову соответствует один фиксированный вектор, независимо от контекста. Итогом этого этапа является формирование входного тензора – многомерной матрицы размерности $Batch\ Size \times Sequence\ Length \times Embedding\ Dim$, где *Batch Size* – количество комментариев, обрабатываемых одновременно, *Sequence Length* – максимальное количество слов в комментариях, *Embedding Dim*

– размерность векторного представления каждого слова [13]. Выбор данной размерности обусловлен техническими требованиями к обучению нейронных сетей. Фиксированная длина последовательностей обеспечивает эффективное выполнение пакетной обработки данных (*batch processing*) на графических процессорах. Применение слоя *embeddings* позволяет преобразовать текстовые данные в формат, оптимизированный для вычислительных операций.

Выходные данные, генерируемые нейронной сетью, представляют собой вектор размерностью 3. Этот вектор содержит вероятностные оценки принадлежности каждого комментария к одной из категорий: конструктивной, деструктивной или нейтральной. Такое представление данных известно как *one-hot* кодирование [17]. В этом формате только один элемент вектора принимает значение 1, в то время как все остальные элементы равны 0. Данная форма выхода применяется в сочетании с функцией активации *Softmax*, предназначенной для распределения вероятности модели между всеми классами.

Также в рамках исследования были определены основные принципы формирования обучающего корпуса, предназначенного для последующего обучения нейросетевой модели. В данном контексте под термином «корпус» понимается совокупность текстовых материалов (в данном случае – комментариев), подвергшихся соответствующей лингвистической разметке. Каждый комментарий в корпусе дополнительно подлежит ручной аннотации по одному из трех классов. В дополнение к лексической разметке отдельных слов в комментариях может быть использован предварительно сформированный словарь. Также следует соблюдать следующие ключевые принципы при построении корпуса:

- семантическое разнообразие комментариев;
- сбалансированное распределение по классам для минимизации смещения модели;
- реалистичность контекста, или привязка к живому онлайн-дискурсу;
- чистота лингвистической аннотации, которую обеспечивает эксперт-лингвист (социолог-исследователь) на этапе ручной разметки.

Обсуждение. Представленное исследование посвящено разработке концептуальной модели нейронной сети, предназначенной для классификации пользовательских высказываний в социальных сетях по их содержательной направленности: конструктивной, деструктивной или нейтральной. В отличие от общепринятых подходов, которые сосредоточены на сентимент-анализе, данная работа предлагает концепцию классификации, основанную на коммуникативной и прагматической функциях высказывания. Это определяет, как архитектурные характеристики модели, так и методологический подход к формированию обучающих данных.

Проведённый анализ существующих методик выявил, что в задачах анализа пользовательского контента наиболее часто используются модели,

направленные на определение эмоционального окраса текста – позитивного, негативного или нейтрального. Традиционные алгоритмы машинного обучения, включая логистическую регрессию и наивный байесовский классификатор, в основном применяются в комбинации с вручную разработанными описаниями признаков. Однако они не обладают способностью учитывать контекст или специфические формы выражения, характерные для цифровой коммуникации, такие как ирония. Предложенная система классификации демонстрирует принципиальные отличия от классического сентимент-анализа. В то время как сентимент-анализ базируется преимущественно на оценочных маркерах и полярности лексических единиц, типологизация, представленная в данной работе, учитывает семантико-прагматическую нагрузку текста. Данный подход обеспечивает выявление случаев скрытой или ироничной агрессии, а также идентификацию предложений, содержащих конструктивные инициативы. Кроме того, осуществляется распознавание текстов, не обладающих выраженной эмоциональной окраской, но выполняющих четкую коммуникативную функцию. Такой подход обладает более высокой релевантностью для решения задач автоматической модерации и оценивания уровня цифровой агрессии в социальных сетях. Таким образом, сравнительный анализ подтверждает необходимость разработки нейросетевой архитектуры для содержательной типологизации высказываний, а не их эмоциональной оценки.

В отличие от существующих методик анализа цифрового интернет-контента, которые преимущественно фокусируются на явных проявлениях агрессивного поведения, таких как использование оскорбительной лексики, инвектив или эмоционально окрашенных выражений, предлагаемый подход направлен на выявление содержательного аспекта текста. Это обстоятельство особенно важно в контексте реализации возможностей нормативной фильтрации, когда пользователи предпринимают попытки обойти автоматизированные системы модерации, используя такие стратегии, как сарказм, эвфемизмы, аллюзии или формально нейтральную лексику. Таким образом, классификация речевых актов по прагматической функции позволяет идентифицировать пассивно-агрессивные, манипулятивные и демотивирующие речевые формы, которые не могут быть выявлены традиционными методами анализа.

Современные методы анализа естественного языка, основанные на архитектуре трансформеров (например, *BERT*), демонстрируют высокую эффективность в задачах сентимент-анализа и тематической классификации. Однако, данные подходы направлены на лексико-семантический уровень анализа, тогда как в рамках данного исследования ставится задача проведения типологизации высказываний по их содержательной функции. По каждой из задач исследования были получены промежуточные и концептуальные результаты, представленные далее.

В ходе анализа существующих методик было выявлено, что текущие алгоритмы тонального анализа не обеспечивают надежного выявления деструктивных высказываний с нейтральной эмоциональной окраской. Данный аспект приобретает особую значимость в контексте нормативного регулирования контента в цифровом пространстве. В связи с этим возникла необходимость разработки альтернативной методологии типологизации.

В рамках обоснования перехода к данному виду типологизации, была представлена трёхкомпонентная типология речевых актов, включающая категории конструктивных, деструктивных и нейтральных высказываний, основанная на их выводной прагматической функции. Данный подход уже нашёл применение в социолингвистических и медиалингвистических исследованиях, однако до настоящего момента не был интегрирован в алгоритмы нейросетевой обработки текста [15].

Создание структуры словаря, отражающей семантическую направленность лексических единиц, обеспечило формирование основы для автоматизированной аннотации текстового корпуса. Структура была разработана на основе лингвистических критериев, включающих семантические, стилистические и прагматические характеристики. Это отличает его от традиционных словарей полярности, которые обычно опираются на частотный анализ или оценочную классификацию.

Архитектура разработанной нейросетевой модели была оптимизирована с учетом специфики коротких пользовательских текстов и расширена за счет включения опции выбора метода векторизации текста, таких как *BERT*, *Word2Vec* и *GloVe*. Применение двунаправленного *LSTM*-блока обусловлено необходимостью анализа контекста с обеих сторон. Добавление слоя агрегации и полносвязного слоя направлено на стабилизацию выходного сигнала и подготовку данных для финальной классификации.

В разделе, посвященном подготовке обучающих данных, была представлена аргументация в пользу использования стандартизированного формата представления входных данных в виде тензоров фиксированной размерности и выходных данных в форме *one-hot* векторов [2]. Также разработаны критерии отбора текстовых материалов для обучающего корпуса, предусматривающие сбалансированное распределение по классам и привлечение экспертов-лингвистов на этапе аннотирования, для обеспечения высокой достоверности ожидаемых результатов.

Стоит отметить, что на данном этапе исследование носит моделирующий и концептуальный характер, и в тексте не заявлены эмпирические результаты обучения модели. Однако все проектируемые компоненты разработаны с учетом рекомендаций, изложенных в стандарте ПНСТ 838-2023/ИСО/МЭК 23053:2022, который предоставляет рамочную структуру для систем искусственного интеллекта, использующих машинное обучение, а также стандарта IEEE 3168-2024, устанавливающего методы оцен-

ки устойчивости сервисов обработки естественного языка, использующих машинное обучение [1, 10].

Результаты, полученные в ходе исследования, демонстрируют, что интеграция семантико-прагматического словаря с функциональной типологией речевых форм позволяет осуществить более глубокий и качественный анализ цифрового дискурса, чем это возможно при использовании традиционных бинарных моделей и соответствуют современной парадигме междисциплинарного анализа интернет-коммуникации, интегрирующей методы лингвистики, искусственного интеллекта и изучения цифровых практик. В рамках научной значимости данное исследование реализует междисциплинарный подход, расширяя область применения нейросетевых моделей за пределы традиционного анализа тональности текстовых данных. Основное внимание уделено на семантико-прагматическую классификацию текстовой информации, что открывает новые перспективы для изучения языковых и коммуникативных процессов. Предложенный вариант модели может быть применен как в прикладных задачах, таких как автоматическая модерация и мониторинг цифровой агрессии, так и для проведения более глубокого анализа речевого поведения в виртуальной среде.

Выводы. В ходе анализа существующих методов sentiment-анализа были выявлены их ограничения в задачах классификации высказываний по содержательной направленности, что подтвердило необходимость разработки новой типологической модели.

Была обоснована трёхуровневая система типологизации пользовательских высказываний, основанная на их прагматической функции.

Была предложена структура специализированного словаря, включающего токены, леммы, теги категорий и контекстуальные примеры. Словарь ориентирован на семантические и прагматические признаки, характерные для цифрового дискурса. Также была разработана концептуальная модель, описывающая основные этапы обработки пользовательских комментариев для построения данного словаря.

Была спроектирована концептуальная модель архитектуры нейросетевой классификационной модели на базе *BiLSTM* с возможностью выбора метода векторизации (*Word2Vec*, *GloVe*, *BERT*), а также описана её компонентная структура с пояснением функций каждого слоя.

Были определены форматы представления входных и выходных данных, включая структуру входного тензора и выходных *one-hot* векторов, а также обоснованы принципы построения обучающего корпуса с лингвистической аннотацией.

Разработанная методика классификации, основанная на содержательных характеристиках лексических единиц и прагматической типологии, позволит обеспечить адаптивный и интерпретируемый подход к анализу пользовательских высказываний. Данный метод отличается от классических моделей, которые основываются исключительно на оценке полярности

текста. В рамках дальнейшего исследования планируется тематическое моделирование содержательной направленности социально-политической коммуникации пользователей сетевых региональных сибирских сообществ в рамках собранного датасета с ручной корректировкой содержательного контента участников сети и программная разработка предложенной модели нейронной сети и её апробация на реальных данных, представленных в виде пользовательских комментариев, собранных в сообществах социальной сети «ВКонтакте» из регионов Сибири ресурсного типа: Ханты-Мансийского автономного округа, Кемеровской области-Кузбасса, Республики Хакасия и Республики Тыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. «ПНСТ 838-2023/ИСО/МЭК 23053:2022. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Искусственный интеллект. Структура описания систем искусственного интеллекта, использующих машинное обучение» от 15.11.2023 г. № 57-пнст // Официальный интернет-портал правовой информации.
2. AdvanceSplice: Integrating N-gram one-hot encoding and ensemble modeling for enhanced accuracy / M. Reza Rezvan, A. Ghanbari Sorkhi, Ja. Pirgazi, M. Mehdi Pourhashem Kallehbasti // Biomedical Signal Processing and Control. – 2024. – Vol. 92. – P. 106017. – DOI 10.1016/j.bspc.2024.106017. – EDN YAKMHW.
3. An Improved BiLSTM Approach for User Stance Detection Based on External Commonsense Knowledge and Environment Information / P. Jia, Ya. Du, J. Hu [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – Vol. 12, No. 21. – P. 10968. – DOI 10.3390/app122110968. – EDN FRLAKR.
4. Bednarek, M., Taboada, M. Attitude in Reported and Non-reported News: A Critique of Sentiment Analysis in Corpus Pragmatics. Corpus Pragmatics (2025). <https://doi.org/10.1007/s41701-025-00185-6>
5. Chai, Ch.P. Comparison of text preprocessing methods / Ch.P. Chai // Natural Language Engineering. – 2023. – Vol. 29, No. 3. – P. 509-553. – DOI 10.1017/s1351324922000213. – EDN VKPHJT.
6. Digital 2024: The Russian Federation // DataReportal URL: <https://datareportal.com/reports/digital-2024-russian-federation/?q=russia%20> (дата обращения: 15.04.2025).
7. Dogan, Ya. A New Global Pooling Method for Deep Neural Networks: Global Average of Top-K Max-Pooling / Ya. Dogan // Traitement du Signal. – 2023. – Vol. 40, No. 2. – P. 577-587. – DOI 10.18280/ts.400216. – EDN XZLNZP.
8. Efficient Classification of Malicious URLs: M-BERT—A Modified BERT Variant for Enhanced Semantic Understanding / B. Yu, F. Tang, D. Ergu [et al.] // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 13453-13468. – DOI 10.1109/access.2024.3357095. – EDN SMGSPL.
9. Halim, L.R. Cyberbullying Sentiment Analysis with Word2Vec and One-Against-All Support Vector Machine / L.R. Halim, A. Suryadibrata // IJNMT (International Journal of New Media Technology). – 2021. – Vol. 8, No. 1. – Pp. 57-64. – DOI 10.31937/ijnmt.v8i1.2047. – EDN OFEVVP.
10. IEEE Std 3168-2024. IEEE Standard for Robustness Evaluation of Natural Language Processing Systems Using Machine Learning. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024. – 62 p.
11. Mao, Ya. Sentiment analysis methods, applications, and challenges: A systematic literature review / Ya. Mao, Q. Liu, Yu. Zhang // Journal of King Saud University. Computer and Information Sciences. – 2024. – Vol. 36, No. 4. – P. 102048. – DOI 10.1016/j.jksuci.2024.102048. – EDN PKEZQN.
12. Tan, K.L. RoBERTa-GRU: A Hybrid Deep Learning Model for Enhanced Sentiment Analysis / K.L. Tan, Ch.P. Lee, K.M. Lim // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 3915. – DOI 10.3390/app13063915. – EDN PLLEUP.
13. Tensor-Based Adaptive Filtering Algorithms / L.M. Dogariu, C.L. Stanciu, C. Elisei-Iliescu [et al.] // Symmetry. – 2021. – Vol. 13, No. 3. – P. 481. – DOI 10.3390/sym13030481. – EDN VDAJTZ.
14. Wei, K. The Pragmatic Functions of High-Frequency Discourse Marker So in Chinese EFL Teacher Talk / K. Wei, S. Li // International Journal of Languages, Literature and Linguistics. – 2024. – Vol. 10, No. 3. – P. 323-325. – DOI 10.18178/ijll.2024.10.3.535. – EDN SBQVSO.
15. Добросклонская, Т.Г. Медиалингвистика: теория, методы, направления / Т.Г. Добросклонская. – М.: "КДУ", "Добросвет", 2020. – 178 с. – DOI 10.31453/kdu.ru.91304.0107. – EDN CQKWES.
16. Закон Российской Федерации "Федеральный закон "О внесении изменений в Федеральный закон "Об информации, информационных технологиях и о защите информации"" от 23.12.2020 г. № 530-ФЗ // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2020 г. – с изм. и допол. в ред. от 30.12.2020.
17. Караваев, А.В. Оценка важности категориальных признаков с использованием one-hot-кодирования для модели линейной и гребневой регрессии / А.В. Караваев, В.Г. Мосин // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: VIII Международ. науч.-практич. конф. (школа-семинар) молодых ученых: сборник материалов, Тольятти, 20-22 апреля 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Тольяттинский государственный университет. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2022. – С. 174-179. – EDN PCGZPP.
18. Комарова, Е.В. Проблема цифрового этикета в русских и английских медиатекстах: на материале миграционного дискурса / Е.В. Комарова // Медиалингвистика. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 253-264. – DOI 10.21638/spbu22.2023.207. – EDN MFJOQV.
19. Лутовинова, О.В. Коммуникативные Интернет-типажи агрессивного поведения как кросс-культурный феномен / О.В. Лутовинова // Актуальные проблемы филологии и педагогической лингвистики. – 2021. – № 3. – С. 158-171. – DOI 10.29025/2079-6021-2021-3-158-171. – EDN CAPIPX.
20. Маршаков, Д.В. Сравнение результатов нейросетевой классификации с применением softmax и функции расстояния / Д.В. Маршаков // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 8. – С. 75-78. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_8_75. – EDN SHGJKI.
21. О понятии влияния в концепции когнитивного моделирования при использовании функции активации типа ReLU / В.И. Балута, В.П. Осипов, Ю.Г. Рыков, Б.Н. Четверушкин // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2023. – № 4. – С. 59-71. – DOI 10.14357/20718632230406. – EDN AWCVVW.
22. Савельев, Г.О. Применение различных методов семантико-прагматического анализа на примере конфликтных текстов в информационном пространстве / Г.О. Савельев // Современное педагогическое образование. – 2023. – № 12. – С. 355-359. – EDN EIVTCA.
23. Сазонов, М.А. Исследование задачи классификации публикаций социальных сетей на предмет выявления положительного отношения / М.А. Сазонов, С.В. Шекшув // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8, № 3 (30). – DOI 10.26102/2310-6018/2020.30.3.014. – EDN KQOUOF.
24. Чижик, А.В. Сравнение моделей векторизации текстов для задачи анализа тональности коротких сообщений из социальных сетей / А.В. Чижик // Компьютерная лингвистика и вычислительные онтологии. – 2024. – № 7. – С. 81-89. – DOI 10.17586/2541-9781-2024-7-81-89. – EDN XGQWKN.
25. Эволюция алгоритмов машинного обучения: от классических моделей к нейросетевым методам / Г. Тайджанов, С. Аннамрадова, А. Агаджыков, Я. Акмырадов // Ceteris Paribus. – 2024. – № 3. – С. 18-21. – EDN DTOPCV.

Статья публикуется при поддержке гранта РНФ «Социальная и политическая мобилизация конструктивного и деструктивного типа в условиях множества сетевых миров сибирских регионов ресурсного развития: возможности применения инструментов data-mining» (24-28-01230)

Статья поступила в редакцию 22.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 504.05/.06

EDN: SMIWZL

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА В ПРЕДЕЛАХ ТЕРРИТОРИИ ПРОЖИВАНИЯ

©Автор(ы) 2025

SPIN: 9459-8170

AuthorID: 1122812

ORCID: 0009-0000-1224-1770

ResearcherID: JCW-6897-2023

МИШИНА Кристина Дмитриевна, аспирант

Пензенский государственный университет

(440026, Россия, г. Пенза, улица Красная, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)

SPIN: 3024-1393

AuthorID: 183204

ORCID: ID 0000-0001-9299-1005

ResearcherID: Y-3115-2018

ScopusID: 56613172200

БОДИН Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Биомедицинская инженерия»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: bodin_o@inbox.ru)

SPIN: 2392-7599

AuthorID: 617670

ORCID: 0000-0002-6224-9827

ПОЗДНЯКОВА Татьяна Николаевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,

доцент кафедры «Биомедицинская инженерия»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: 1a/11 tanjapozd@mail.ru)

ГРУДКИНА Анастасия Алексеевна, магистрант кафедры «Биомедицинская инженерия»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11)

Аннотация. С каждым годом возрастает число промышленных предприятий, автомобильного транспорта и объектов хозяйственной деятельности. Их рост приводит к увеличению выбросов опасных химических веществ в атмосферный воздух, что приводит к ухудшению экологического благополучия человека на территории его проживания. Для того что бы улучшить условия жизни людей, проживающих вблизи промышленных объектов, необходимо осуществлять мероприятия по выявлению опасных химических веществ, проводить анализ воздействия загрязнителей на окружающую среду и здоровье человека, а также разрабатывать лечебно-профилактические и природоохранные мероприятия. В статье предложено техническое обеспечение (схема системы и алгоритм функционирования) информационной системы определения экологического благополучия на территории проживания человека. Разработан алгоритм, включающий в себя комплексные технические средства, обеспечивающие функционирование информационной системы, сбор и использование необходимой информации для определения химически опасных веществ в атмосфере и разделение территории проживания населения на зоны в зависимости от загрязнения атмосферного воздуха. Предложена схема проведения оценки здоровья населения, проживающего на исследуемой территории. Все это необходимо для определения экологического благополучия человека и для проведения лечебно-профилактических мероприятий для определенной эколого-экономической группы и проведение природоохранных мероприятий для каждой территориальной зоны.

Ключевые слова: информационная система, техническое обеспечение, экологическое благополучие человека, территория проживания, промышленные объекты, атмосферный воздух, опасные химические вещества.

INFORMATION SYSTEM FOR DETERMINING THE ECOLOGICAL WELL-BEING OF A PERSON WITHIN THE TERRITORY OF RESIDENCE

©The Author(s) 2025

MISHINA Kristina Dmitrievna, postgraduate student

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail: kristina_mishina_1998@mail.ru)

BODIN Oleg Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of the department «Biomedical engineering»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: bodin_o@inbox.ru)

POZDNYAKOVA Tatiana Nikolaevna, candidate of agricultural sciences,

docent of the department « Biomedical engineering»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11, e-mail: tanjapozd@mail.ru)

GRUDKINA Anastasia Alekseevna, master student of the department « Biomedical engineering»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarin Street, 1a/11)

Abstract. The number of industrial enterprises, motor transport and business facilities is increasing every year. Their growth leads to an increase in emissions of dangerous chemicals into the atmospheric air, which leads to a deterioration in the environmental well-being of a person in his territory of residence. In order to improve the living conditions of people living near industrial facilities, it is necessary to carry out measures to identify hazardous chemicals, analyze the effects of pollutants on the environment and human health, as well as develop therapeutic, preventive and environmental measures. The article proposes the technical support of an information system for determining environmental well-being in the territory of human habitation. An algorithm has been developed that includes complex technical means for ensuring the functioning of the information system, collecting and using the necessary information to identify chemically hazardous substances in the atmosphere and dividing the territory of the population into zones depending on atmospheric air pollution. A scheme for assessing the health of the population living in the study area is proposed. All this is necessary to determine the ecological well-being of a person and to carry out therapeutic and preventive measures for a certain ecological and economic group and to carry out environmental protection measures for each territorial zone.

Keywords: information system, technical support, human environmental well-being, residential area, industrial facilities, atmospheric air, hazardous chemicals.

Для цитирования: Мишина К.Д. Информационная система определения экологического благополучия человека в пределах территории проживания / К.Д. Мишина, О.Н. Бодин, Т.Н. Позднякова, А.А. Грудкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 2(70). – С. 124-132. – EDN: SMIWZL.

Введение. С развитием цивилизации человек окружает себя различными техногенными объектами, приборами и оборудованием, которые облегчают его жизнедеятельность. С увеличением количества объектов техносферы человек забывает о естественной составляющей окружающей среды, которая вносит значительный вклад в состояние здоровья населения.

Согласно данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), выделяются следующие источники риска для здоровья человека: образ жизни (50%); окружающая среда (25%); наследственность (20%); здравоохранение (5%). Таким образом, экологическое состояние на территории проживания человека оказывает значительное влияние на состояние его здоровья [1, 2]. Совокупность всех источников риска для здоровья человека, а также развитие населения, будущих поколений и государства, которое является экологически безопасным и обеспеченным качественными экосистемными услугами называется экологическим благополучием человека (ЭБЧ). Оно определяется совокупностью здоровья человека, состоянием природных и водных ресурсов, уровнем загрязнения атмосферного воздуха, наличием зеленых зон и парков в городских территориях, а также использованием новых экологических технологий [3, 4].

Увеличение автомобильного транспорта на дорогах и рост промышленных предприятий приводит к увеличению выбросов в атмосферный воздух различных загрязняющих химических веществ, таких как оксиды серы, азота, угарный газ, органические

вещества (бензол, толуол, формальдегид, углеводороды и др.) и взвешенные вещества. При увеличении их предельно допустимых концентраций (ПДК) в атмосфере оказывается негативное влияние на организм человека, и вызываются заболевания органов дыхания, сердечно-сосудистой и нервной системы, развитие аллергических реакций и новообразований. Например, длительное воздействие выбросов промышленных предприятий приводит к снижению продолжительности жизни и увеличению смертности. Наличие в атмосферном воздухе углеводородов, альдегидов, кетонов и фенолов при попадании в организм человека вызывают нарушение работоспособности репродуктивной, нервной, сердечно-сосудистой и гормональной систем, а также заболевания органов дыхания и пищеварения [5-11].

Целью работы является разработка информационной системы определения экологического благополучия человека в пределах территории его проживания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить основные факторы загрязнения атмосферного воздуха;
- осуществить зонирование территории проживания человека;
- проанализировать влияние загрязнения атмосферного воздуха на заболеваемость населения;
- определить состояние экологического благополучия человека.

Методология. Для определения экологического благополучия человека в пределах территории

проживания необходима информационно-измерительная система, которая обеспечивает:

- мониторинг состояния атмосферного воздуха вблизи промышленных объектов и территории проживания населения;
- передачу данных в аналитический центр и сравнение полученных значений с требованиями нормативных документов;
- зонирование территории на определенные зоны в зависимости от характера загрязнения атмосфер-

ного воздуха;

- определение состояния здоровья населения, проживающего на данной территории;
- проведение лечебно-профилактических и природоохранных мероприятий для улучшения экологического благополучия населения, проживающего на данной территории.

На рисунке 1 приведён алгоритм работы информационно-измерительной системы определения экологического благополучия человека.

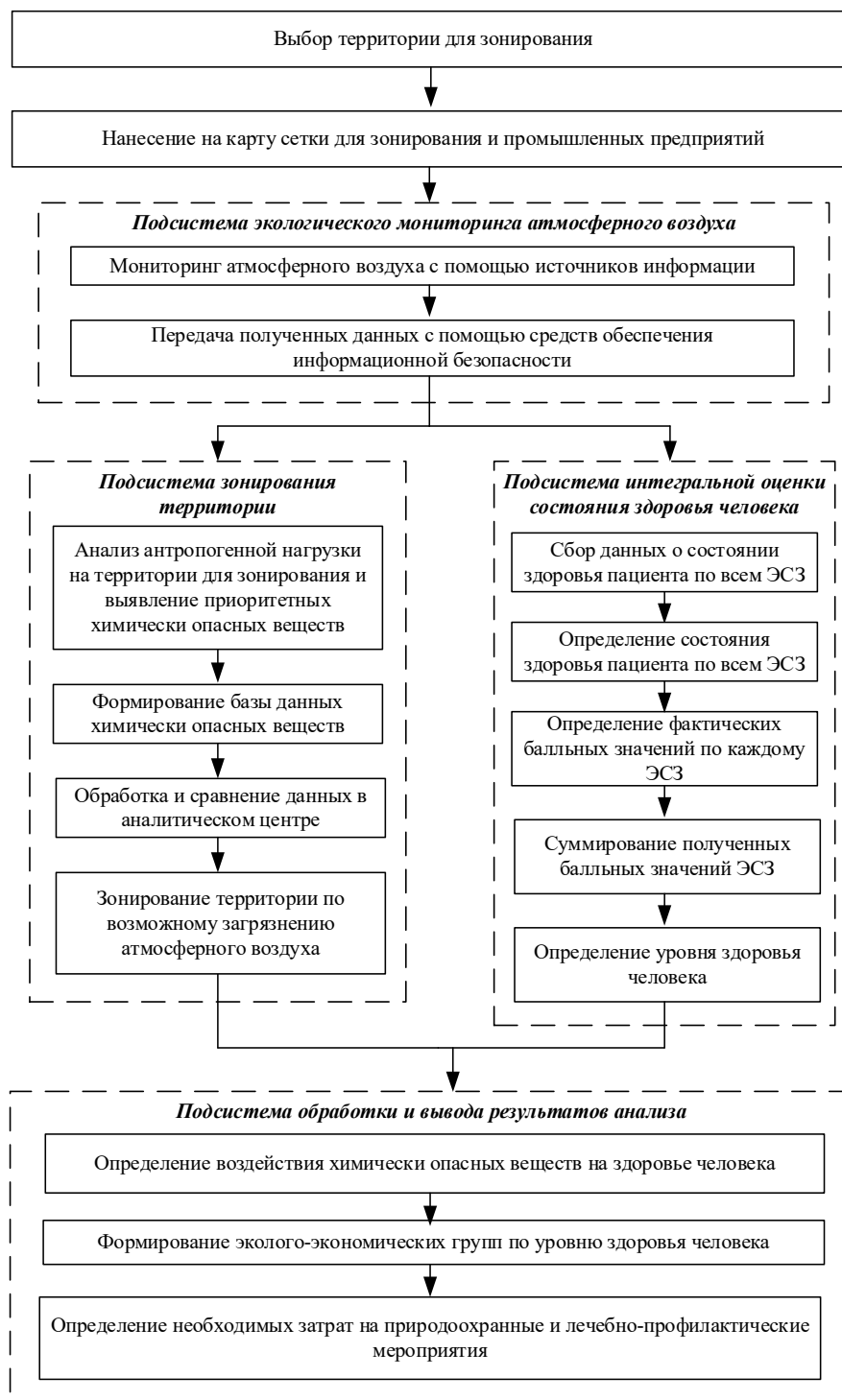


Рисунок 1 – Алгоритм работы информационно-измерительной системы определения экологического благополучия человека

Как следует из рисунка 1, данная система состоит из трёх подсистем:

- подсистемы экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона [12];
- подсистемы зонирования территории по уровню риска для здоровья населения в условиях воздействия химически опасных веществ [13];
- подсистемы интегральной оценки здоровья человека [14].

Работа такой системы заключается в выборе территории, на которой расположено промышленное предприятие, для которого будет проводиться исследование. Данная территория отмечается на карте для зонирования, туда же наносится сетка и анализируемое промышленное предприятие [13].

На выбранной территории осуществляется мониторинг атмосферного воздуха с помощью различных источников информации (метеостанции, датчики замеров концентраций загрязняющих веществ, системы GPS, датчики экологического контроля и др.) и осуществляется передача полученных данных с использованием средств обеспечения информационной безопасности [12].

После получения данных о состоянии атмосферного воздуха на территории для зонирования осуществляется выявление приоритетных и наиболее опасных химических веществ, выбрасываемых в атмосферу. Формируются базы данных на основе проведенного анализа для зонированной территории. Концентрации химически опасных веществ, найденных в атмосферном воздухе, сравниваются с ПДК, прописанными в санитарно-гигиенических нормативах [15].

Параллельно с исследованием состояния атмосферного воздуха проводится оценка состояния здоровья населения, проживающего на территории зонирования, на основе [14]. Обследование человека осуществляется по каждому элементу системы «здоровье» (ЭСЗ):

- фактору здоровья: наследственность, образ жизни, внешняя среда, культура общественных отношений, медико-санитарная помощь;
- показателю здоровья: болезнь или дефект развития, физическое развитие, физиологические резервы, неспецифическая резистентность, мотивация здоровья.

Данные получают при осмотре пациента в лечебно-медицинском учреждении, при прохождении диагностических и клинических исследований, опросе и сборе анамнеза пациента.

Полученную информацию в ходе проведения исследования по каждому элементу системы «здоровье» переводят в балльные значения, которые затем суммируются для получения общей оценки состояния здоровья пациента.

Общую оценку состояния здоровья пациента, дифференцируют по шести уровням здоровья (первый – предельный, второй – минимальный, третий – низкий, четвертый – средний, пятый – высокий,

шестой – оптимальный). На основе полученной оценки возможно прогностически оценить динамику уровня здоровья в общем и каждого элемента системы «здоровье» отдельно («положительная» при установлении 5 и 6 уровней здоровья, «без изменений» при установлении 3 и 4 уровней здоровья, «отрицательная» – при установлении 1 и 2 уровней здоровья).

После получения информации о состоянии атмосферного воздуха и здоровья населения на исследуемой территории при помощи «подсистемы обработки и вывода результатов анализа» определяют влияние опасных химических веществ, находящихся в атмосфере, на здоровье населения. С учетом установленного уровня здоровья разделяют население, проживающее на зонированной территории, на 3 эколого-экономических групп и для каждой группы разрабатывают определенные лечебно-профилактические мероприятия, направленные на поддержание или улучшение состояния здоровья людей.

Таким образом, работа такой информационно-измерительной системы поможет определить качество состояния атмосферного воздуха на территории проживания населения, оценить уровень здоровья людей, проживающих на данной территории, разделить население на определенные группы в зависимости от уровня их здоровья, для проведения необходимых лечебно-профилактических мероприятий и тем самым улучшить экологическое благополучие человека в пределах территории проживания.

Результаты. Промышленные предприятия в результате своей работы осуществляют выброс в атмосферный воздух различных химических веществ, которые могут оказывать негативное влияние на состояние окружающей среды и здоровье человека. Наиболее распространенными загрязняющими веществами, которые могут оказывать негативное влияние при увеличении их концентраций в атмосферном воздухе, являются диоксиды серы и азота (SO_2 , NO_2), взвешенные вещества, монооксид углерода (CO) и формальдегид (CH_2O). Концентрация веществ в атмосферном воздухе сравнивается с их ПДК [15], которые приведены в таблице 1, на основе данного сравнения делается вывод о загрязненности атмосферного воздуха на анализируемой территории.

Таблица 1 – Предельно допустимые концентрации опасных химических веществ

Параметр	SO_2	NO_2	ВВ	CO	CH_2O
ПДК, мг/м ³	0,05	0,04	0,075	3,0	0,003

Таким образом, выбранную для зонирования территорию можно разделить на 3 зоны в зависимости от концентрации химически опасных веществ, найденных в атмосферном воздухе (рис. 2).

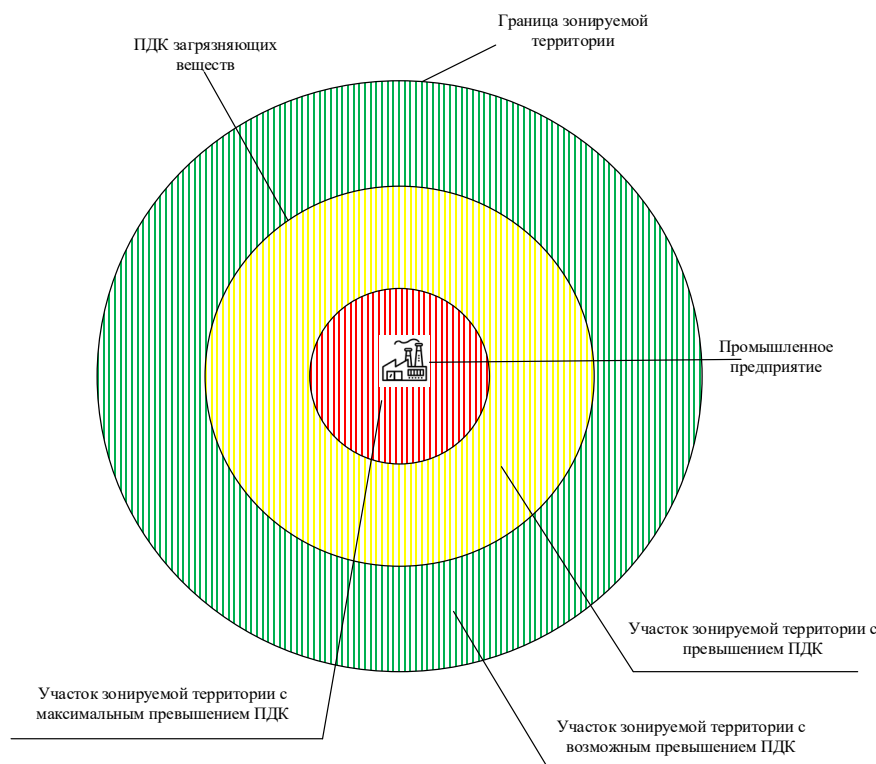


Рисунок 2 – Зонирование территории проживания

Зона № 1 или «участок зонированной территории с максимальным превышением ПДК» – это зона непосредственной близости к промышленному предприятию, которая является зоной наибольшего воздействия химически опасных веществ на организм человека, так как данный участок территории будет характеризоваться наибольшим превышением ПДК химически опасных веществ.

Зона № 2 или «участок зонированной территории с превышением ПДК» – это санитарно-защитная зона промышленного предприятия, являющаяся более безопасной для здоровья человека, так как на этом участке концентрация опасных химических веществ в атмосферном воздухе равна ПДК или имеет небольшое превышение, что в отличие от зоны № 1 оказывает меньшее влияние на состояние здоровья человека, но из-за кумулятивного эффекта загрязняющие вещества могут накапливаться в организме человека, что будет вредить его здоровью.

Зона № 3 или «участок зонированной территории с возможным превышением ПДК» – размер этой зоны составляет более двух размеров санитарно-защитной зоны и является наиболее безопасной для нахождения и проживания населения, так как является наиболее удаленной от промышленного предприятия и поэтому концентрация химически опасных веществ в атмосферном воздухе не превышает ПДК.

Согласно представленному зонированию территории проживания зона № 1 и зона № 2 являются наиболее опасными для проживания человека, так как концентрация опасных веществ в атмосферном воздухе превышает ПДК. Графическое представление такого зонирования территории проживания

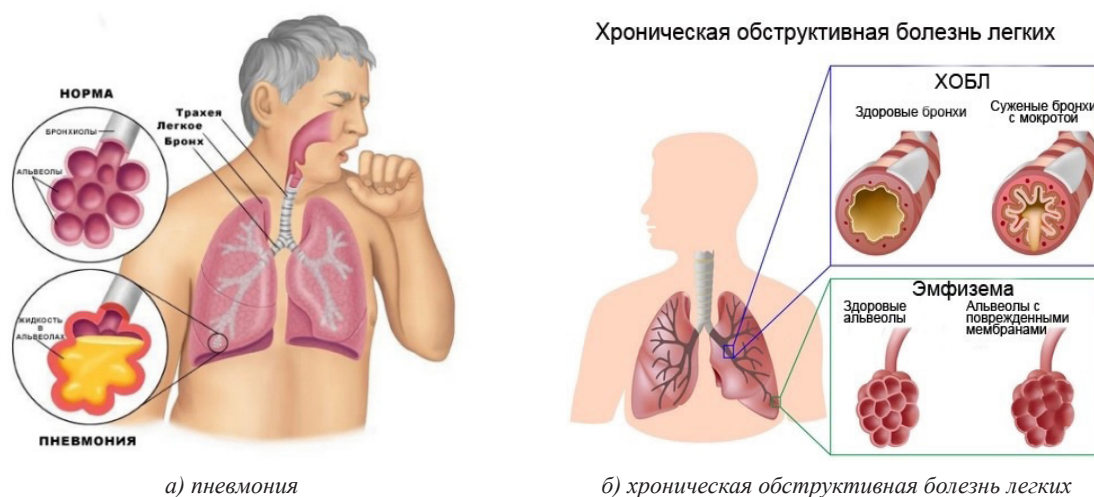
населения представлено на рисунке 2.

Проведенный анализ научных данных свидетельствует о наличии прямой корреляционной зависимости между уровнем загрязнения атмосферного воздуха и развитием заболеваний органов дыхания. Особую опасность представляют диоксид серы, диоксид азота и взвешенные вещества, увеличение концентрации этих веществ в атмосферном воздухе приводит к развитию хронического бронхита, бронхиальной астмы, хронической обструктивной болезни легких, пневмонии, аденокарциномы дыхательных путей и раку легких (рис. 3) [5, 6].

Превышение ПДК взвешенных веществ и диоксида серы в атмосферном воздухе представляет значительную угрозу для здоровья населения, особенно в отношении сердечно-сосудистой и кровеносной систем.

Эти загрязнители, взаимодействуя с биологическими системами, могут вызывать ряд серьезных патологических состояний, таких как ишемическая болезнь сердца, атеросклероз, артериальная гипертензия, инфаркт миокарда, инсульт, анемия и рак крови (рис. 4) [7, 9, 11].

Увеличение концентрации диоксида азота, взвешенных веществ и формальдегида в атмосферном воздухе существенно влияет на здоровье человека, способствуя развитию заболеваний органов пищеварения. Эти химически опасные вещества, проникая в организм человека могут вызывать воспалительные процессы в желудочно-кишечном тракте, способствовать развитию гастрита, язвенной болезни и синдрома раздраженного кишечника (рис. 5) [7, 9, 10].



Развитие рака легких

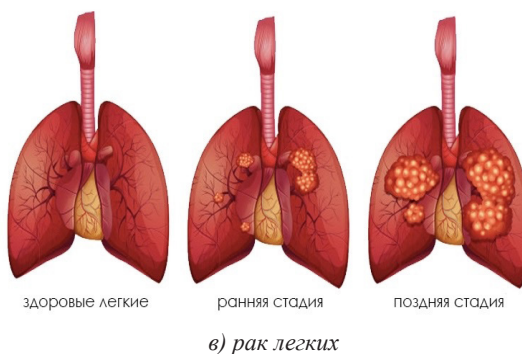


Рисунок 3 – Возникновение болезней органов дыхания под воздействием опасных химических веществ

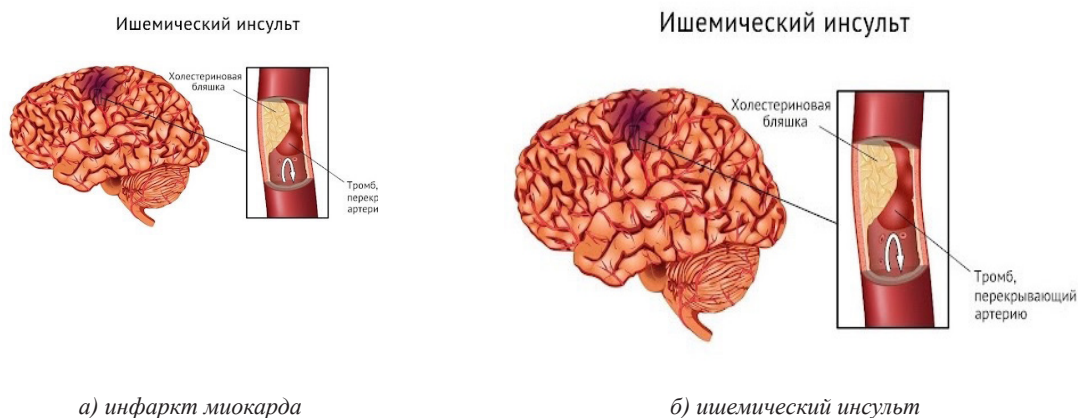


Рисунок 4 – Возникновение болезней сердечно-сосудистой системы под воздействием опасных химических веществ



Рисунок 5 – Возникновение болезней органов пищеварения под воздействием опасных химических веществ

Обсуждение. Для разработки эффективных лечебно-профилактических мер для жителей зонированных территорий необходимо разделять население на эколого-экономические группы. Критериями для такого разделения могут служить показатели здоровья, что позволит адаптировать медицинские и профилактические программы в соответствии с конкретными потребностями каждой группы.

Разделение на эколого-экономические группы авторами предлагается, основываясь на [14], алгоритм разделения населения в зависимости от уровня здоровья представлен на рисунке 6.

Таким образом, согласно данному алгоритму людей, проживающих на исследуемой территории, можно разделить на 3 группы, в зависимости от

прогностической оценки их здоровья.

В рамках данного исследования особое внимание уделяется группе с «отрицательной прогностической оценкой», которая проживает в зоне с максимальным превышением ПДК опасных химических веществ в атмосферном воздухе. Эта группа характеризуется низким уровнем здоровья, что связано с наибольшим негативным воздействием химических загрязнителей. Проживание в условиях повышенного загрязнения воздуха оказывает значительное влияние на общее состояние здоровья, что проявляется в увеличении частоты заболеваний дыхательной, сердечно-сосудистой и пищеварительной систем, а также в снижении общего состояния иммунитета.

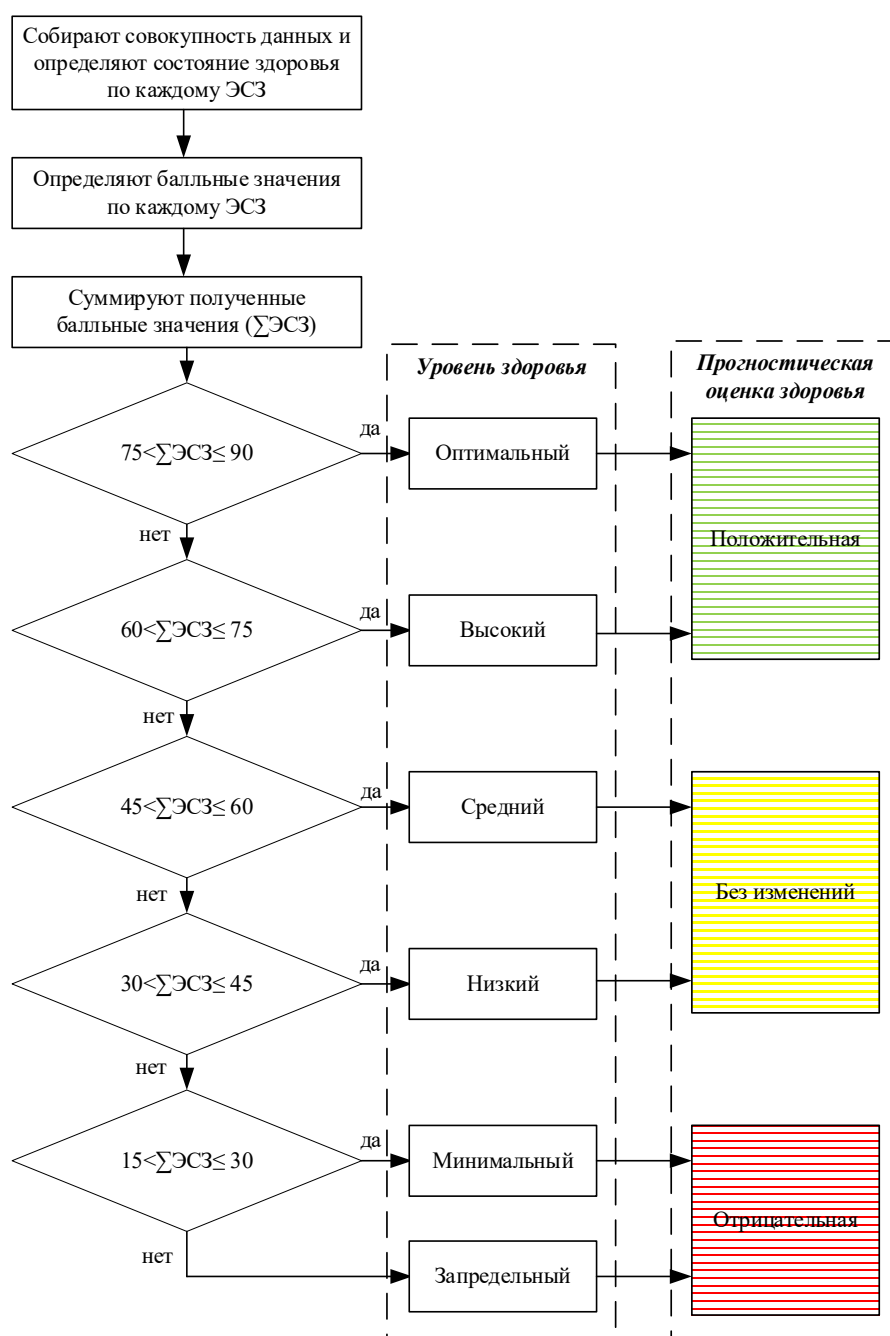


Рисунок 6 – Алгоритм разделения населения на эколого-экономический группы по уровню здоровья

Для улучшения здоровья этой группы необходимо разработать и внедрить комплексные меры, направленные на снижение уровня загрязнения воздуха, а также на повышение осведомленности населения о важности здорового образа жизни и регулярных медицинских осмотров. Важным аспектом является также развитие инфраструктуры для оказания своевременной медицинской помощи и проведения профилактических мероприятий.

В рамках исследования также рассматривается группа населения с «без изменений» прогностической оценкой здоровья, проживающая в зоне с незначительным превышением ПДК опасных химических веществ в атмосферном воздухе. Хотя непосредственное воздействие на здоровье этой группы минимально, но кумулятивный эффект может привести к постепенному накоплению вредных веществ в организме, что в свою очередь, способствует ухудшению состояния здоровья человека.

Для минимизации рисков этой группы населения необходимо разработать и внедрить меры, направленные на снижение уровня загрязнения окружающей среды. Важно также проводить регулярные медицинские обследования для раннего выявления возможных негативных изменений в состоянии здоровья и своевременного вмешательства.

Третья группа населения, характеризующаяся «положительной прогностической оценкой здоровья», проживает в зоне возможного превышения ПДК загрязняющих веществ в воздухе. Несмотря на относительно благоприятный прогноз, длительное воздействие таких условий может привести к скрытым негативным изменениям в состоянии здоровья.

Для поддержания и улучшения состояния данной группы необходимо повысить осведомленность населения о значимости здорового образа жизни, регулярных медицинских осмотров и мер по защите от опасных химических веществ.

Выводы. На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что экологическое благополучие человека является совокупностью внешних и внутренних факторов, влияющих на здоровье человека.

Основываясь на [12-15] был предложен алгоритм информационно-измерительной системы, с помощью которой возможно проведение оценки экологического благополучия человека путем исследования атмосферного воздуха, оценке состояния здоровья человека и разделения территории на зоны с учетом эколого-экономических групп. Такая система позволяет установить взаимное влияние качества атмосферного воздуха и здоровья населения, проводить профилактические мероприятия для поддержания здоровья населения, создать медицинские центры и оказать качественную медицинскую помощь для населения, проживающего в зоне с повышенным уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Таким образом, осуществляется комплексный подход, включающий меры по снижению загряз-

нения, регулярные медицинские обследования и образовательные программы, который позволит эффективно поддерживать экологическое благополучие человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Безбородова О.Е., Герасимов А.И., Бодин О.Н., Рахматуллин Ф.К., Трофимов А.А. Использование оценки коморбидности в системе обеспечения экологического благополучия человека // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 52-68. doi:10.21685/2072-3059-2023-2-4.
2. Гичев Ю.П. К вопросу классификации экологически обусловленных заболеваний человека для целей изучения влияния загрязнения окружающей среды на здоровье населения // Сибирский медицинский журнал (Иркутск). – 1996. – Т. 6, № 1. – С. 36-41.
3. Безбородова О.Е. Информационно-измерительная система для оценки экологического благополучия человека // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2022. – № 4. – С. 124-137. doi:10.21685/2227-8486-2022-4-8.
4. Безбородова О.Е. Имитационное моделирование взаимодействия человека и объекта техносферы в информационно-измерительных и управляющих системах обеспечения экологического благополучия человека // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 1. – С. 164-177. doi:10.21685/22278486-2023-1-11.
5. Шадиметов Ю.Ш., Айрапетов Д.А. Влияние промышленности на окружающую среду и здоровье населения // Наукосфера. – 2023. – № 4 (2). – С. 76-81. DOI 10.5281/zenodo.7883043.
6. Бенганов Ш.М. Загрязнение атмосферного пространства как следствие техногенного воздействия // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 7-1(70). – С. 14-16. DOI 10.24412/2500-1000-2022-7-1-14-16. EDN VTRYVK.
7. Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р., Цинкер М.Ю., Бабина С.В., Клейн С.В., Андришунас А.М. Параметризация зависимостей между факторами риска и здоровьем населения при хроническом воздействии многокомпонентного загрязнения атмосферного воздуха. Анализ риска здоровью. – 2022. – № 4. – С. 33-44.
8. Wahyunengseh R.D., Hastjarjo S. Big Data Analysis of Policies on Disaster Communication: Mapping the issue of communication and public responses in the government social media // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 717, № 1. P. 012004. DOI: 10.1088/1755-1315/717/1/012004.
9. Assessment of Trace Elements Supply in Canned Tuna Fish Commercialized for Human Consumption in Brazil / N.V. de Lima, D. Granja Arakaki, E.S. de Padua Melo, D.J. Machate, V.A. do Nascimento // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2021. – Vol. 18, № 22. – P. 12002. DOI: 10.3390/ijerph182212002.
10. Зайцева Н.В., Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р., Устинова О.Ю., Бабина С.В., Цинкер М.Ю., Чигвинцев В.М. Анализ рисков потерь здоровья и комплексная оценка эффективности целевых мер территориальных систем здравоохранения по снижению смертности населения от сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Здравоохранение Российской Федерации. 2021; 65(4): 302-309. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2021-65-4-302-309>.
11. Нурисламова Т.В., Уланова Т.С., Попова Н.А., Мальцева О.А. Методическое обеспечение социально-гигиенического и медико-биологического мониторинга потенциально опасного высокотоксичного акрилонитрила в атмосферном, выдыхаемом воздухе и крови // Гигиена и санитария. – 2016. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskoe-obespechenie-sotsialno-gigienicheskogo-i-mediko-biologicheskogo-monitoringa-potentsialno-opasnogo-vysokotoksichnogo> (дата обращения: 05.04.2025).
12. Патент 2549222 Российская Федерация, МПК G 01W 1/00. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленного региона / Бодин О.Н., Казаков В.А., Андреев А.Н., Сурцукова Л.С., Пименов А.К., Синюков Е.С., Крюков А.Е., Экимов И.И. – № 2013122314/28, заяв. 14.05.2013, опубл. 20.04.2015.

13. Патент 2782525 Российская Федерация, МПК G 16H 10/00. Способ и система зонирования территории по уровню риска для здоровья населения в условиях воздействия химически опасных веществ / Безбородова О.Е., Бодин О.Н., Шерстнев В.В., Холуденева А.О., Мартынов Д.В. – № 2021119277, заявл. 17.08.2021; опубл. 28.10.2022.

14. Патент 2119768 Российская Федерация, МПК A61B10/00. Способ интегральной оценки здоровья человека / Щетинин А.Н. – № 95115282/14, заявл. 30.08.1995; опубл. 10.10.1998.

15. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания, утв. постановлением главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2, зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296.

Статья поступила в редакцию 14.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 621.3

EDN: USTPDY

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ
ОПОРНО-ПОВОРОТНЫМ УСТРОЙСТВОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

©Автор(ы) 2025

SPIN: 1517-5411

AuthorID: 1236864

МЕРЗЛЯКОВ Юрий Владимирович, соискатель

*АО «Пензенское производственное объединение электронной вычислительной техники имени В.А. Ревунова»
(440039, Россия, Пенза, ул. Гагарина, 13, e-mail: analyzer@ppoevt.ru)*

SPIN: 7238-6773

AuthorID: 454532

ТРУБИЦКОВ Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Прикладная информатика»

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

SPIN: 5120-6459

AuthorID: 1233409

АЛЕНИН Артем Михайлович, студент

*Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, e-mail: пр. Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, e-mail: artemonalenin@yandex.ru)*

Аннотация. Антенные системы, представляют собой чрезвычайно разнообразные объекты по своим размерам, конструктивным особенностям, характеристикам направленности и частотному диапазону, поэтому контроль их качества сложный и многогранный процесс. При этом развитие технологий контроля и испытаний готовых изделий отстают от развития промышленных технологий их производства. Возникает проблема, заключающаяся в разрешении противоречий, связанных с несоответствием скорости производства и проведения процедур приемки изделий из-за отсутствия, автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов (АИК) тестирования радиоэлектронных изделий. Традиционные методы измерения диаграмм направленности и коэффициентов усиления рупорных антенн и сборок на их основе в реальном производстве осуществляется с использованием в основном оборудования с ручным управлением, что требует много времени и возможно возникновение ошибок из-за субъективного фактора в процессе обработки данных. Поэтому потребовалась разработка и внедрение нового АИК антенных измерений. Решение данной задачи было осуществлено путём декомпозиции опорно-поворотного устройства на отдельные узлы с различными динамическими характеристиками. Для каждого обособленного узла были разработаны соответствующий кинематический узел, ПО и алгоритм, что позволило осуществлять движение системы вокруг каждой из осей одновременно, тем самым существенно повысилась производительность АИК. Таким образом, предложено научно обоснованное комплексное программно-аппаратное решение физического уровня позволяющее повысить точность и оперативность антенных измерений и полностью исключить субъективные ошибки и автоматизировать процесс получения характеристик измеряемых устройств.

Ключевые слова: автоматизация измерений; антенные системы; управление электроприводами; динамические характеристики; проведение антенных измерений.

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM AND SOFTWARE FOR CONTROLLING
THE ROTARY SUPPORT DEVICE OF THE AUTOMATED MEASURING COMPLEX (AMC)
OF ANTENNA MEASUREMENTS**

© The Authors 2025

MERZLYAKOV Yuri Vladimirovich, applicant

*JSC «Penza Production Association of Electronic Computer Equipment named after V.A. Revunov»
(440039, Russia, Penza, Gagarin St., 13, e-mail: analyzer@ppoevt.ru)*

TRUBITSKOV Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent,
associate professor of the Department of Applied Informatics

*Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukov Pr./Gagarin St., 1a/11, e-mail: sv_trubitskoi@mail.ru)*

ALENIN Artem Mikhailovich, student

*Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukov Pr./Gagarin St., 1a/11, e-mail: artemonalenin@yandex.ru)*

Abstract. Antenna systems are extremely diverse objects in terms of their size, design features, directional characteristics and frequency range, so quality control is a complex and multifaceted process. At the same time, the

development of technologies for control and testing of finished products lags behind the development of industrial technologies for their production. There is a problem in resolving contradictions related to the discrepancy between the speed of production and the procedures for product acceptance due to the lack of automated measuring and computing complexes (AIC) for testing electronic products. Traditional methods of measuring radiation patterns and gain coefficients of horn antennas and assemblies based on them in real production are carried out using mainly manually controlled equipment, which takes a lot of time and errors may occur due to a subjective factor in the data processing process. Therefore, it was necessary to develop and implement a new AIC of antenna measurements. The solution to this problem was achieved by decomposing the pivot device into separate nodes with different dynamic characteristics. For each isolated node, a corresponding kinematic node, software and algorithm were developed, which allowed the system to move around each of the axes simultaneously, thereby significantly increasing the performance of the AIC. Thus, a scientifically based integrated hardware and software solution of the physical level is proposed, which makes it possible to increase the accuracy and efficiency of antenna measurements and completely eliminate subjective errors and automate the process of obtaining the characteristics of the measured devices.

Keywords: measurement automation; antenna systems; control of electric drives; dynamic characteristics; antenna measurements.

Для цитирования: Мерзляков Ю.В. Разработка алгоритма и программное обеспечение управления опорно-поворотным устройством автоматизированного измерительного комплекса антенных измерений / Ю.В. Мерзляков, С.В. Трубицков, А.М. Аленин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Т. 15. – № 2(70). – С. 133-137. – EDN: USTPDY.

Введение. Измерение параметров антенн является критически важной задачей в области радиотехники и связи. Точность и оперативность измерений напрямую влияют на качество проектирования и разработки антенных систем [1, 2]. Традиционные методы измерения диаграмм направленности обычно требуют в среднем, в зависимости от количества точек измерения углов и дискретности частот от 1 до 8 часов времени (следует из анализа различных методик поверки рупорных антенн). Очевидно, что автоматизация процесса измерений может значительно повысить производительность, точность и воспроизводимость результатов [8, 9].

Методология. Для проектирования механической части АИК были использованы методы иерархической декомпозиции и последовательных приближений. Опорно-поворотное устройство было условно разбито на два типа приводов (относительно горизонтально и вертикальной осей поворота) с целью поиска и устранения слабых мест в исходной конструкции [3, 13, 15]. Опираясь на заданные размеры и габариты устройства, были сконструированы приводы (для каждой из осей) состоящие из кинематической пары и шагового двигателя соответственно. Данная конструкция приводов, разработанного электронного блока управления и программно-аппаратной части, также алгоритма позволяет использовать АИК как в автоматическом, так и в ручном режиме управления взаимным движением опорно-поворотных устройств.

Результаты. Композиции методов и средств автоматизированного формирования программно-аппаратных решений, обеспечивающих сохранение конструктивно-функциональной целостности устройства в процессе его модификации и в результате проведения натурных испытаний был разработан АИК состоящий из следующих основных компонентов:

– два идентичных опорно-поворотных устройства, приводимых в движение электроприводами, реализованными на базе шаговых двигателей, что обеспечивает точное и плавное вращение антенн в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

– измерительное устройство, которое принимает и обрабатывает сигнал, с выхода испытуемой антенны – в зависимости от типа измеряемых параметров (диаграмма направленности, коэффициент усиления и т.д.) могут использоваться различные устройства (анализатор спектра, измеритель мощности, анализатор цепей скалярный);

– система управления – компьютер с установленным программным обеспечением, отвечающим за управление опорно-поворотными устройствами, сбор данных с измерительного прибора и обработку результатов;

– программное обеспечение – выполняет управление электроприводами обоих опорно-поворотных устройств с заданной точностью, синхронизацию вращения антенн с процессом сбора данных с измерительного прибора, автоматический сбор, обработку, визуализацию в виде диаграмм направленности и других графиков результатов измерений, а также экспорт данных в различные форматы (например, PNG, TXT).

Впервые было применено сочетание методов иерархической декомпозиции, последовательных приближений и системного представления проективных решений в соответствии с критерием конструктивно-функциональной целостности, что позволило синтезировать из имеющихся конструктивно-функциональных элементов и вновь разработанных кинематических узлов автоматический измерительный комплекс с заранее заданными параметрами [14].

Обсуждение. Создан комплекс оборудования, состоящий из двух идентичных опорно-поворотных устройств позволяющий получать характеристики

антенных систем, как в ручном, так и автоматическом режимах. Для этого в каждое устройство были интегрированы специально спроектированные привода, детали, которых изготовлены с применением аддитивных технологий на 3D-принтерах из углепластика. Внесение дополнительных изменений в конструкцию поворотного устройства вокруг горизонтальной оси позволило получить опорно-поворотные устройства с фиксированным центром тяжести, т.е. оси вращения объекта исследования проходят через его центр тяжести. Такое конструктивное решение существенно повысило экономичность (крутящий момент стремится к минимальному значению, а, следовательно, позволяет существенно снизить мощность используемого шагового двигателя) и точность взаимного позиционирования угла относительно соответствующей оси

поворота.

Разработанная с использованием САПР конструкция приводов и электронного блока управления обеспечит точность выставления углов поворота относительно вертикальной оси: $\pm 0,004$ град, относительно горизонтальной оси: $\pm 0,003$ град. При этом, были использованы отечественные шаговые двигатели и элементная база. Выбор типа привода (шаговый двигатель, коллекторный двигатель) обусловлен требуемой точностью и скоростью вращения. Двигатели имеют многополюсную конструкцию, что способствует высокой точности позиционирования.

Для реализации алгоритмов управления опорно-поворотными устройствами была разработана схема электронного блока управления, представленная на рисунке 1.

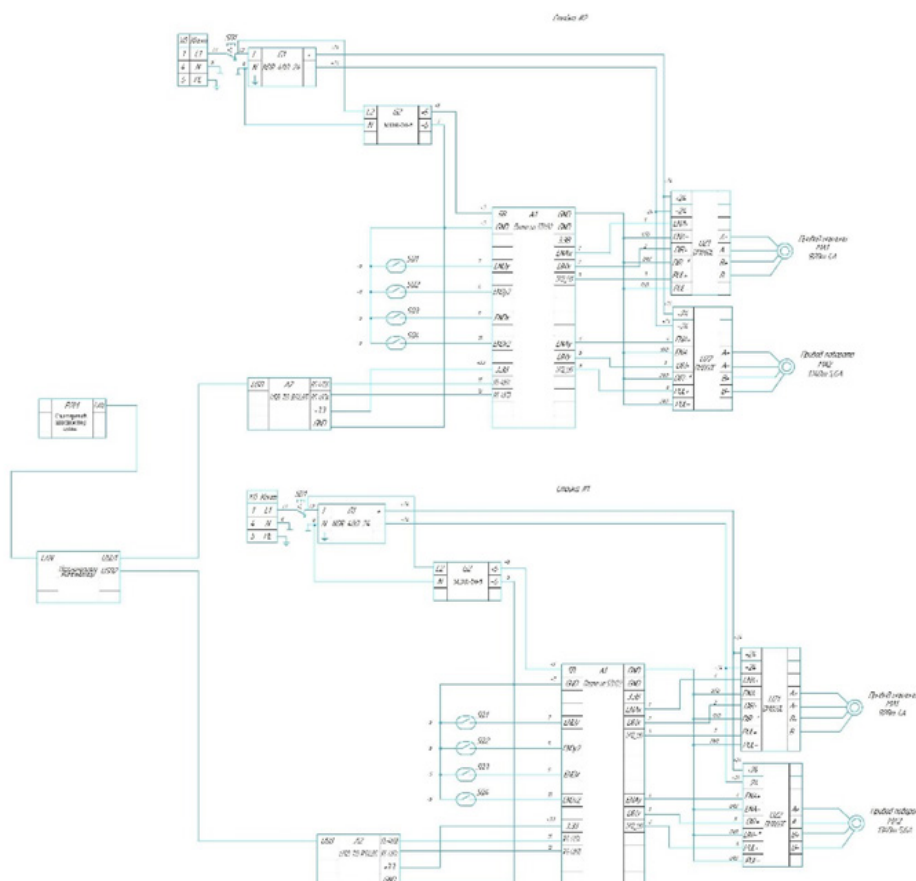


Рисунок 1 – Схема блока управления АИК

АИК состоит из двух блоков управления, а также устройства P2M и персонального компьютера.

Блоки управления состоят из:

- двух драйверов управления шаговыми двигателями DM860E, двух шаговых двигателей PL86H151-D14 и PL57H110-D8 привода горизонтальной и вертикальной оси соответственно;
- микроконтроллера STM32F103C8T6 управления опорно-поворотным устройством;
- двунаправленного преобразователя логических уровней RS485 to USB (чип FT232RL и SP485EEN);
- двух микропереключателей – концевиков

для контроля точности начального положения опорно-поворотного устройства АИК относительно вертикальной оси и двух микропереключателей – концевиков для горизонтальной оси.

При проведении антенных измерений, всегда используется пара антенн или антенных сборок и два опорно-поворотных устройства соответственно. Поэтому, чтобы обеспечить надежную коммуникацию и синхронизацию двух опорно-поворотных устройств был разработан алгоритм [4], для которого было написано ПО на языке C++/CLI (являющимся языком с открытым исходным кодом, что делает его

неподверженным санкциям) для управления АИК [5-7]. Это позволяет оптимизировать измерения с возможностью одновременно вращать обе стойки, как в автоматическом режиме, так и в ручном режиме, оказывая поддержку оператору. Это обеспечивает высокую скорость и точность измерений характеристик антенн с возможностью удобной обработки и анализа полученных данных [10, 12].

На рисунке 2 показан алгоритм, который обес-

печивает удобное и интуитивно понятное управление АИК, предоставляя пользователю возможности для точной и гибкой настройки всех составляющих.

Более того, данное ПО может использоваться и с другими поворотными устройствами без внесения изменений в программный код, поскольку программа не привязана ни к чему, кроме градусов поворота вокруг горизонтальной и вертикальной осей [11].

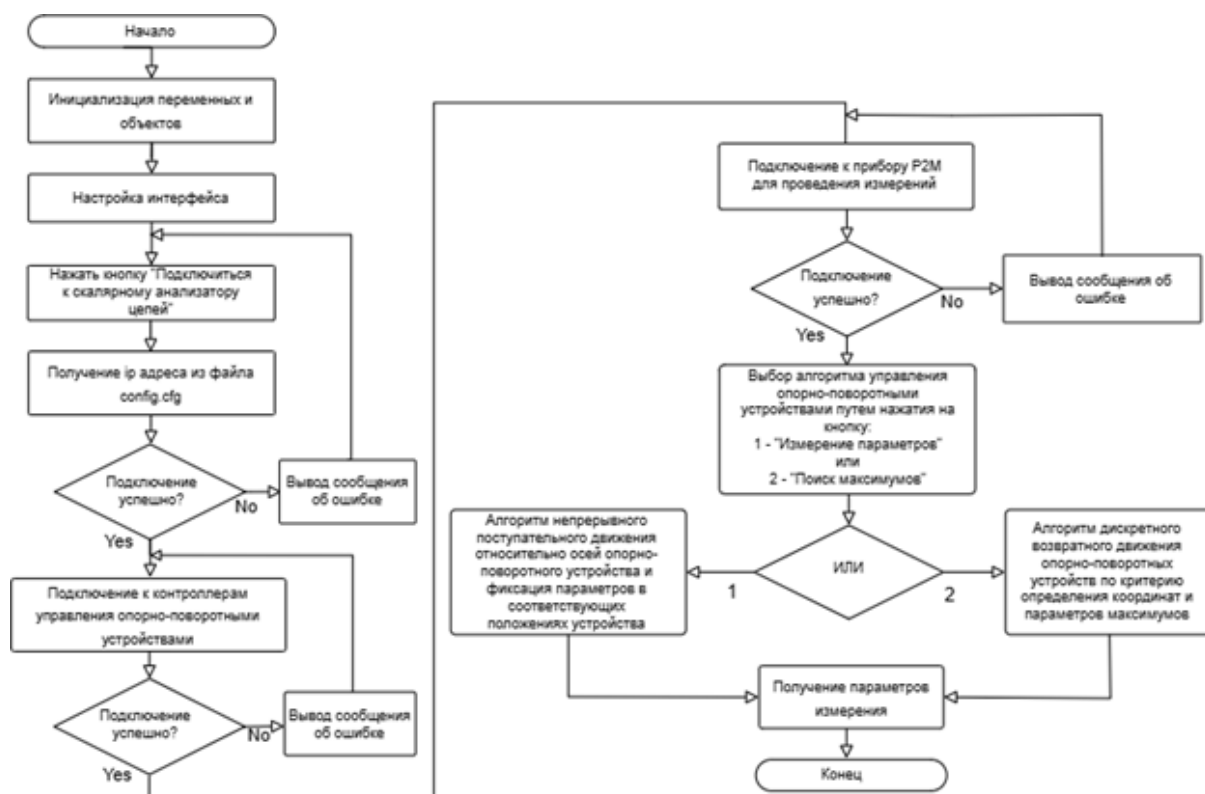


Рисунок 2 – Алгоритм управления АИК

Выводы. Разработанные конструкции, алгоритмы управления, ПО и применённые технологии показали свою высокую эффективность при снижении времени работы в 4 раза относительно ручных измерений. Удалось не просто сохранить точность, а сделать её выше для углов направленности (относительно горизонтальной и вертикальной осей). В ручном режиме точность составляла ± 1 градус, а в автоматическом выросла до ± 1 минуты. Из-за более точного позиционирования, за счет применения алгоритма нелинейного дискретного поиска углов максимума выросла точность привязки измерения коэффициента передачи сигнала относительно параметров направленности, в сравнение с режимом ручного измерения с ± 5 дБ до ± 1 дБ.

Алгоритм непрерывного поступательного движения относительно осей поворотного устройства позволил повысить скорость как минимум в 2 раза (относительно дискретного алгоритма) за счет незначительного снижения точности измерений. Если применять эти алгоритмы в паре можно алгоритмом

непрерывного движения найти в быстром режиме нужный диапазон, а использование дискретного алгоритма позволяет сделать более точные измерения в найденном диапазоне [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мерзляков Ю.В., Пашенко Д.В., Моисеев А.В., Мартышкин А.И. Сравнительный анализ двух алгоритмов позиционирования рупорной антенны // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2024. – № 88. – С. 31-37.
2. Пашенко Д.В., Мерзляков Ю.В. Радиолокация в современной авиации // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023): Труды научно-технической конференции с международным участием / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2023. – С. 65-74.
3. Пашенко Д.В., Мерзляков Ю.В., Мартышкин А.И., Моисеев А.В. Динамический анализ и выбор направления движения при проведении стендовых испытаний приемопередающих устройств // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 45-49.
4. Мерзляков Ю.В. Программа для анализа диаграмм направленности антенн // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 63-66.
5. Буданова А.Е., Вьюнов Д.А., Аленин А.М. Современное

состояние и перспектива развития отечественного процессора Байкал // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования» №107, Март 2024 (Часть 8) - Изд. Научный центр «LJournal», Самара, 2024. – С. 139-142.

6. Толокольников В.В., Выюнов Д.А., Аленин А.М., Прокофьева И.А. Типы файловых систем в операционной системе «GNU/Linux» // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования» №115, Ноябрь 2024 (Часть 15) - Изд. Научный центр «LJournal», Самара, 2024. – С. 142-147.

7. Буданова А.Е., Выюнов Д.А., Аленин А.М., Прокофьева И.А. Современное состояние и перспектива развития отечественной операционной системы Astra Linux // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования» №111, Июль 2024 (Часть 8) – Изд. Научный центр «LJournal», Самара, 2024. – С. 27-29.

8. Пашенко Д.В., Мерзляков Ю.В. Проблемы настройки и испытаний авиационных радиоэлектронных комплексов // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023): Труды научно-технической конференции с международным участием / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2023. – С. 74-79.

9. Мерзляков Ю.В., Пашенко Д.В. Обзор и варианты синтеза диаграмм направленности рупорных антенн // VII Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований»: сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. ун-тет., 2023. – С. 28-30.

10. Пашенко Д.В., Мерзляков Ю.В., Мартышкин А.И., Моисеев А.В., Зупарова В.В. Исследование вероятностного алгоритма позиционирования эталонной антенны в направлении, обеспечивающем максимальное значение коэффициента усиления сигнала // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 49-53.

11. Пашенко Д.В., Мерзляков Ю.В., Мартышкин А.И., Маркин Е.И. Возможный вариант организации хранения диаграмм направленности антенн // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 53-57.

12. Пашенко Д.В., Мерзляков Ю.В., Мартышкин А.И., Зупарова В.В. Структура и функционал программного обеспечения анализа диаграмм направленности антенн // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 57-62.

13. Трубицков С.В., Когельман Л.Г., Аленин А.М., Прокофьева И.А. Автоматизированное механическое устройство для коррекции двигательных функций руки у людей с ОВЗ // Современные информационные технологии. – 2023. – № 38 (38). – С. 108-110.

14. Иванов, С.А. Проектирование и оптимизация конструкций машин и оборудования: учебник для вузов / С.А. Иванов, А.В. Нефедов, Н.А. Чиченев, – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2014. – 200с.- ISBN 978-5-903472-14-7.

15. Mirbeik-Sabzevari A., Tavassolian N. 10 GHz-100 GHz Compact DoubleRidge Horn Antenna for Ultra-Wideband Millimeter-Wave Biomedical Imaging Applications. In: 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. 05–10 July 2020. Montreal, QC, Canada. IEEE; 2021. – P. 1421-1422.

16. Отчет НИР (НИОКР) «Разработка, изготовление, внедрение автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса антенных измерений» по договору 03/05-05-23 от 03 мая 2023г.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 681.2; 621.3.084

EDN: ZAYTLG

ФАЗОВАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ В ПРОГРАММИРУЕМОМ ТАЙМЕРЕ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 1222-5399

AuthorID: 517750

ORCID: 0000-0003-0933-1212

ResearcherID: P-2232-2015

ScopusID: 7004205146

ЧУЛКОВ Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Биомедицинская инженерия»

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

ЧУЛКОВ Данила Александрович, магистрант кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет
(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: danila.chulkov@mail.ru)

Аннотация. Для решения многих измерительных задач в области автоматической обработки цифровых сигналов необходимо точное программируемое цифровым кодом задание однократных интервалов времени с высоким разрешением. Известные способы построения таймеров подобного назначения либо не обеспечивают необходимой точности, либо отличаются высокой сложностью, ограниченностью пределов программирования интервала времени, либо в составе эталонных приборов излишне дороги. Рассмотрены принципы построения и возможные варианты интегральных хронизирующих устройств на основе кольцевого генератора импульсов, естественным образом осуществляющего фазовую интерполяцию опорного периода с целью сокращения шага дискретизации времени. Предложена структура программируемого таймера с времязадающим ядром в виде кольцевого генератора импульсов, рассмотрены способы и технические средства для стабилизации субкванта отсчета времени и его уменьшения вплоть до субвентильных значений. Структура таймера ориентирована на заказное интегральное исполнение, однако, при некотором усложнении с привлечением встроенных вычислительных возможностей программируемой пользователем вентильной матрицы может быть реализована в виде бюджетного полужаказного прибора.

Ключевые слова: кольцевой генератор, опорная частота, фазовая интерполяция, импульс, цифровая линия задержки, джиттер.

PHASE INTERPOLATION IN PROGRAMMABLE TIMER

© The Authors 2025

CHULKOV Valery Alexandrovich, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Biomedical Engineering

Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukova passage/Gagarina Street, 1a/11, e-mail: chu@penzgtu.ru)

CHULKOV Danila Alexandrovich, master's student

Penza State Technological University
(440039, Penza, Baydukova passage / Gagarinastreet, 1a / 11, e-mail: danila.chulkov@mail.ru)

Abstract. To solve many measurement problems in the field of automatic digital signal processing, it is necessary to accurately program single time intervals with high resolution using a digital code. Known methods for constructing timers for such purposes either do not provide the required accuracy, or are highly complex, have limited time interval programming limits, or are excessively expensive when used as part of reference devices. The principles of constructing and possible variants of integrated timing devices based on a ring pulse generator that naturally performs phase interpolation of the reference period in order to reduce the time sampling step are considered. The structure of a programmable timer with a timing core in the form of a ring pulse generator is proposed, and methods and technical means for stabilizing the time counting subquantum and reducing it down to subvalve values are considered. The structure of the timer is oriented towards a custom integrated design, however, with some complication involving the built-in computing capabilities of a user-programmable gate array, it can be implemented as a low-cost semi-custom device.

Keywords: ring oscillator, reference frequency, phase interpolation, pulse, digital delay line, jitter, phase synchronization.

Для цитирования: Чулков В.А. Фазовая интерполяция в программируемом таймере / В.А. Чулков, Д.А. Чулков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 15. – № 2(70). – С. 138-143. – EDN: ZAYTLG.

Введение. Точное задание интервала времени требуется во многих областях техники при обработке информационных сигналов, в частности, в измерительных, управляющих и телекоммуникационных системах для отсчета задержки относительно запускающего сигнала, либо для формирования импульса заданной длительности [1-3]. В автоматических системах очень часто в таймере предусматривается возможность программирования интервала времени – управления его продолжительностью цифровым кодом.

Задача формирования периодически повторяющегося прецизионного интервала не вызывает затруднений и обычно решается либо простым пересчетом импульсов стабильной частоты, либо при повышенных требованиях к точности – стробоскопическим или компенсационным методами [4]. Для построения формирователя однократного интервала времени обычно используется прямой счет импульсов опорного генератора, который начинается по запускающему сигналу. Этот традиционный широко используемый способ допускает непосредственное программирование, при котором процесс формирования интервала завершается по достижении содержимым счетчика опорных импульсов заданного состояния [5]. Если не учитывать погрешности формирующих каскадов, то генерируемый интервал времени составит MT_0 , где M и T_0 – число накопленных счетчиком импульсов и период опорного генератора. Однако, ввиду несинхронности момента запуска процесса с опорными импульсами, возникает погрешность дискретизации времени $\pm T_0/2$. Если же использовать допускающий стартовый режим релаксационный генератор, то погрешность дискретизации может быть сокращена, однако дополнительные цепи стабилизации опорного периода, сопряженные с резким усложнением устройства, не гарантируют полного устранения погрешности [6-8].

В технике формирования однократных временных интервалов для контроля высокочастотных интегральных схем находят применение пассивные программируемые цифровые линии задержки на коммутируемых проводных соединениях фиксированной длины. Примером может служить прибор *PDDL10* фирмы *GigaBaudics*, представляющий собой

программируемую 7-разрядным двоичным словом цифровую линию задержки, в которой время задержки до 640 пс устанавливается с шагом 5 пс, а джиттер задержанных импульсов не превышает тех же 5 пс [9]. Однако такие уникальные устройства очень дороги и их применение оправдано лишь в качестве эталонного поверочного средства.

Сократить квант времени при измерении и генерировании интервала времени позволяет получивший развитие в последние годы метод фазовой интерполяции (ФИ), основанный на использовании мультифазного кольцевого генератора импульсов и позволяющий благодаря возможности размножения фаз достичь разрешения в доли опорного периода и даже меньше задержки логического вентиля [10-13].

Целью настоящей работы является освещение технических принципов построения прецизионного программируемого таймера на основе метода ФИ.

Методология. Кольцевой генератор импульсов (*Ring Oscillator* в англоязычной литературе) представляет собой замкнутую в кольцо цепь последовательно соединенных элементов задержки, каковыми в интегральной схемотехнике служат обычно логические вентили. Совокупность элементов задержки образует цифровую линию задержки (ЦЛЗ, за рубежом *DDL – Digital Delay Line*), импульсы множества промежуточных отводов которой, смещенные во времени на задержку одного звена (субкванта времени), осуществляют, по сути, интерполяцию периода колебаний. Поскольку параметры однотипных интегральных вентилях от кристалла к кристаллу может иметь значительный технологический разброс, то применение ЦЛЗ в хранирующих устройствах требует стабилизации времени ее задержки. Очевидно, что решение такой задачи подразумевает возможность сопряженного регулирования времени задержки всех звеньев ЦЛЗ, и такая возможность появилась с развитием интегральной схемотехники [14, 15].

Автоматическое регулирование времени задержки ЦЛЗ выполняется путем ее охвата обратной связью, которая в зависимости от способа сравнения с сигналами эталонной частоты превращает ее либо в систему автоподстройки задержки *DLL (Delay Lock Loop)* [16], либо в систему фазовой синхронизации *PLL (Phase Lock Loop)* [17, 18] (рис. 1)

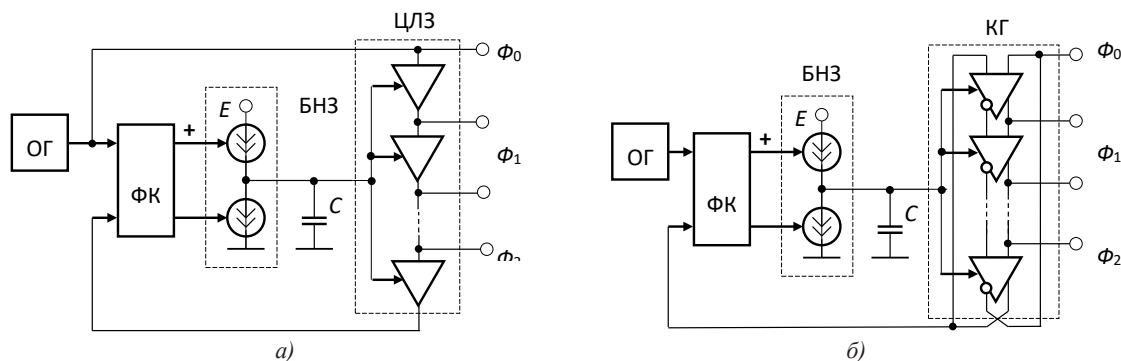


Рисунок 1 – Варианты стабилизации частоты КГ: а – DLL, б – PLL

В обеих системах частота мультифазных колебаний, генерируемых на отводах ЦЛЗ, подстраивается к частоте импульсов опорного генератора (ОГ) с помощью цепи отрицательной обратной связи по фазе, включающей фазовый компаратор (ФК), блок накачки заряда (БНЗ) и фильтра нижних частот в виде интегрирующего конденсатора C . Устройство DLL задерживает опорный импульс в своей ЦЛЗ таким образом, что в установившемся режиме фронт задержанного импульса поддерживается синфазным фронту следующего опорного импульса. При этом ФК не вырабатывает сигналов рассогласования фаз сравниваемых импульсов, а уровень напряжения на конденсаторе C с помощью БНЗ обеспечивает суммарную задержку звеньев ЦЛЗ точно равным опорному периоду. Отличие системы PLL состоит в том, что ЦЛЗ в ней, построенная на дифференциальных элементах задержки и охваченная инверсной обратной связью, образует кольцевой генератор, по которому поочередно распространяются волны «нулей» и «единиц». Механизм фазового сравнения не отличается от механизма в системе DLL , если фазовое рассогласование устранено (или поддерживается постоянным), то частота генерируемых импульсов, связанная с фазой интегральным соотношением, с абсолютной точностью равна опорной частоте. Очевидно, что количество каскадов КГ при том же разрешении, что и в системе DLL , может быть в два раза меньшим, если КГ состоит из $N/2$ каскадов с задержкой t_D , то частота его колебаний будет $f = 1 / N t_D$.

Процесс интерполяции опорного периода можно описать как процедуру его заполнения новыми значащими моментами, отображаемыми δ -импульсами в пределах периода $0 \dots T_O$

$$S(t) = [\sigma(0) - \sigma(T_O)] \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(t - k \frac{T_O}{N}\right),$$

где $[\sigma(0) - \sigma(T_O)]$ – прямоугольный импульс протяженностью в период T_O , образованный парой смещенных единичных скачков противоположных полярностей, N – число фаз кольцевого генератора. Поскольку этот процесс периодически повторяется, то такой способ интерполяции можно назвать непрерывным или циклическим в отличие от локальной интерполяции, в задачу которой входит обозначение оси интерполяции между парой опорных сигналов. Поскольку по сравнению с однофазным опорным генератором здесь предусматривается в N раз большее количество отсчетов за период, то циклическая фазовая интерполяция эквивалентна повышению частоты выборок в N раз с соответствующим повышением точности измерения или задания интервала. Приведенная формула соответствует идеализированному случаю циклической интерполяции, когда позиции δ -импульсов не искажены.

На рисунке 2, где для иллюстрации процессов интерполяции разными средствами показаны фазовые диаграммы, случаю однофазного опорного генератора соответствует диаграмма 2а – отсчет времени осуществляется один раз за период. При исполь-

зовании идеального мультифазного КГ осуществляется циклическая интерполяция равномерно распределенными по периоду δ -импульсами (рис. 1б), количество отсчетов процесса становится в N раз больше, а субквант времени сокращается до $t_D = T_O / N$. Однако в реальном устройстве размеры субквантов времени отдельных звеньев ЦЛЗ могут различаться ввиду технологических отклонений и воздействия шумовых факторов [19, 20].

Показанные на рисунке 2 фазовые диаграммы иллюстрируют процессы интерполяции опорного периода различными способами. В свободно работающем КГ все помехи и шумы проявляются в виде фазового дрожания (джиттера), который накапливается с течением времени (рис. 1в). Если тот же генератор включен в петлю фазовой синхронизации PLL , то дисперсия джиттера равномерно распределяется по фазам КГ (рис. 2с). В системе DLL благодаря инициализации каждого нового периода генерирования внешним опорным импульсом (рис. 2д) составляющая джиттера из-за технологических отклонений оценивается дисперсией [19]

$$\sigma_{im}^2 = \frac{m(N-m)}{N} \sigma_T^2,$$

где N – число элементов задержки в ЦЛЗ, m – номер ее промежуточного отвода. Из этой формулы следует, что «технологическая» дисперсия достигает максимума в середине ЦЛЗ, когда $m = N/2$. Что касается шумовой составляющей джиттера, то она возрастает по мере перемещения импульса по ЦЛЗ, можно показать, что на последнем отводе отклонение импульса от номинальной позиции составит

$$(\Delta T_N)_{\max} \cong 3\sigma_{nu} \sqrt{N}.$$

В этом выражении σ_{nu} – среднеквадратические отклонения времени задержки звена ЦЛЗ.

Анализ джиттера необходим при проектировании таймера, достижение заданной точности которого подразумевает, что совокупный джиттер не должен превышать половину субкванта времени КГ. Следовательно, учет джиттера позволяет определить целесообразное число звеньев ЦЛЗ в составе КГ, а также оценить возможности локальной интерполяции для размножения фаз КГ.

Метод локальной фазовой интерполяции заключается в создании промежуточных точек отсчета внутри субкванта КГ и таким образом в размножении числа его фаз [11]. Принцип такой интерполяции реализуется разными техническими средствами, чаще всего используется взвешенное суммирование пары опорных колебаний с перекрывающимися во времени фронтами, в результате которого образуется третье колебание, фронтом отмечающее ось интерполяции. В схемотехнике КМОП такое суммирование осуществляется простым объединением выходов пары логических вентилях, не приводящим к короткому замыканию.

Рисунок 3 поясняет процесс интерполяции путем сложения трапецеидальных КМОП импульсов

x и y при объединении выходов вентилях, результат сложения – третий импульс z , фронты которого располагаются между фронтами x и y (рис. 3а и 3б). Фазы φ_X и φ_Y в КГ – это фазы импульсов со смежных его выходов. Процедуру интерполяции можно продолжить, разделяя интервал между фронтами x и y на все более малые доли вплоть до субвентиль-

ных величин (рис. 3в – каскадная интерполяция, незатененные элементы – буферы для компенсации задержки в затененных элементах интерполяции). Очевидно, что предел размножения числа фаз КГ диктуется условием непревышения джиттером элементов задержки половины нового субкванта времени.

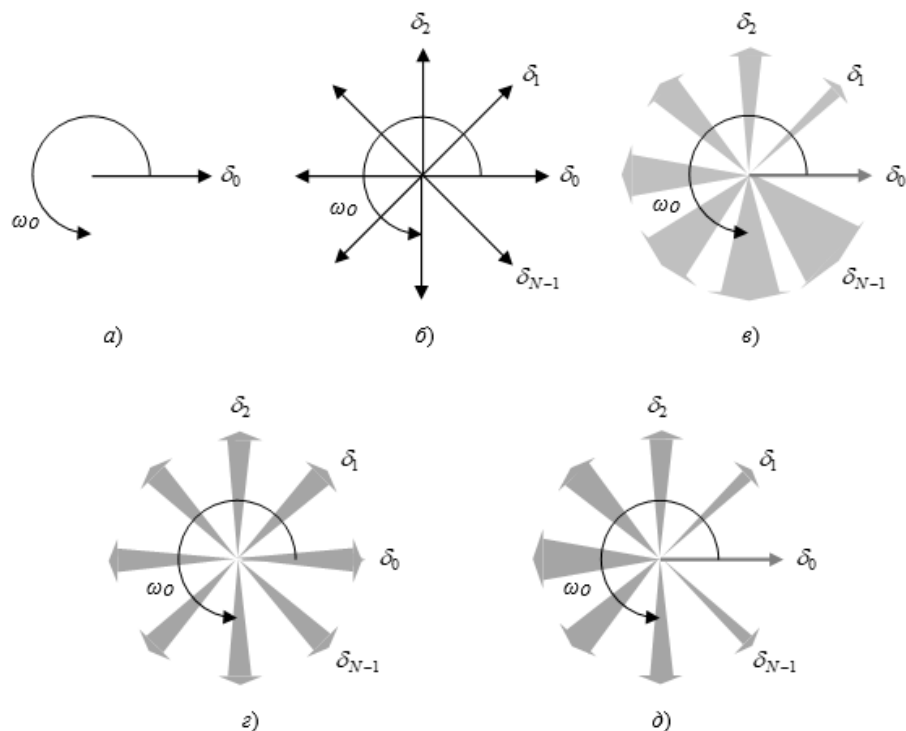


Рисунок 2 – Фазовые диаграммы дискретизации времени: а – однофазная синхронизация, б – идеальная интерполяция, в – кольцевой генератор без обратной связи, г – система PLL, д – система DLL

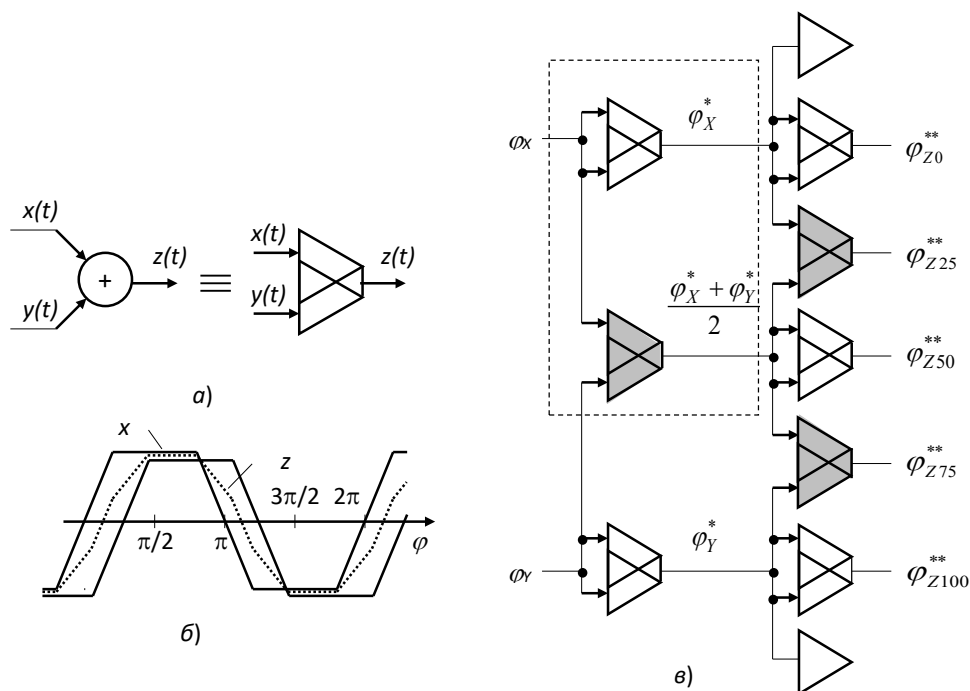


Рисунок 3 – Принцип локальной фазовой интерполяции: а – сложение опорных колебаний x и y и условное обозначение элемента интерполяции, б – образование оси интерполяции при трапецидальных опорных колебаниях, в – размножение фаз каскадной интерполяцией

Результаты. В основу принципа действия программируемого таймера, структура которого показана на рисунке 4, положена идея о фиксации состояния КГ в моменты отсчетов «на лету» без его останова и повторного запуска [21], что позволяет установить и поддерживать неизменной частоту генерирования и, следовательно, шаг дискретизации времени с высокой точностью. Заметим, что принцип аналогового регулирования частоты КГ в отличие от аналога исключает его построение на программируемой вентильной матрице, не допускающей такого регулирования, предлагаемая структура ориентирована на заказное исполнение.

Хронирующим ядром таймера служит N -фазный КГ, подстраивающийся к частоте опорного генератора f_0 с помощью петли PLL (в схеме не показана). Поскольку частота КГ определяется числом его фаз N , то субквант времени t_D при отсчете временного интервала составляет

$$t_D = \frac{1}{2f_0 N}.$$

Последовательность состояний КГ, представляющих собой поочередно пробегающие волны единиц и нулей, шифратором преобразуется в двоичные числа, отображающие позицию распространяющейся волны и поступающие на информационные входы регистра, который в момент поступления сигнала «Старт» фиксирует текущее число шифратора. Это число

соответствует фазе импульса старта внутри периода колебаний КГ. Одновременно тот же импульс, снимая сигнал сброса со счетчика импульсов, разрешает ему пересчитывать периоды КГ с момента запуска, а также взводит триггер T для формирования длительности выходного импульса. Счетчик импульсов необходим для расширения шкалы отсчета времени, он вместе с шифратором образует непрерывно нарастающее двоичное число: счетчик – старшие его разряды; шифратор – его младшие разряды.

Значение формируемого интервала в единицах t_D задается двоичным числом по входу D_T , оно поступает на один вход сумматора (A), на другой вход сумматора (B) приходит зафиксированное регистром значение фазы КГ – исходной точки, от которой осуществляется отсчет времени. В дальнейшем происходит непрерывное увеличение числа, составленного из содержимого счетчика импульсов и шифратора. Когда это число достигнет значения D_T , сработает компаратор, который сбросит выходной триггер.

Длительность импульса на выходе триггера оказывается равной

$$T_D = D_T t_D = \frac{D_T}{2f_0 N},$$

откуда следует, что шаг дискретизации времени и, следовательно, точность таймера тем выше, чем больше опорная частота, и чем больше каскадов КГ.

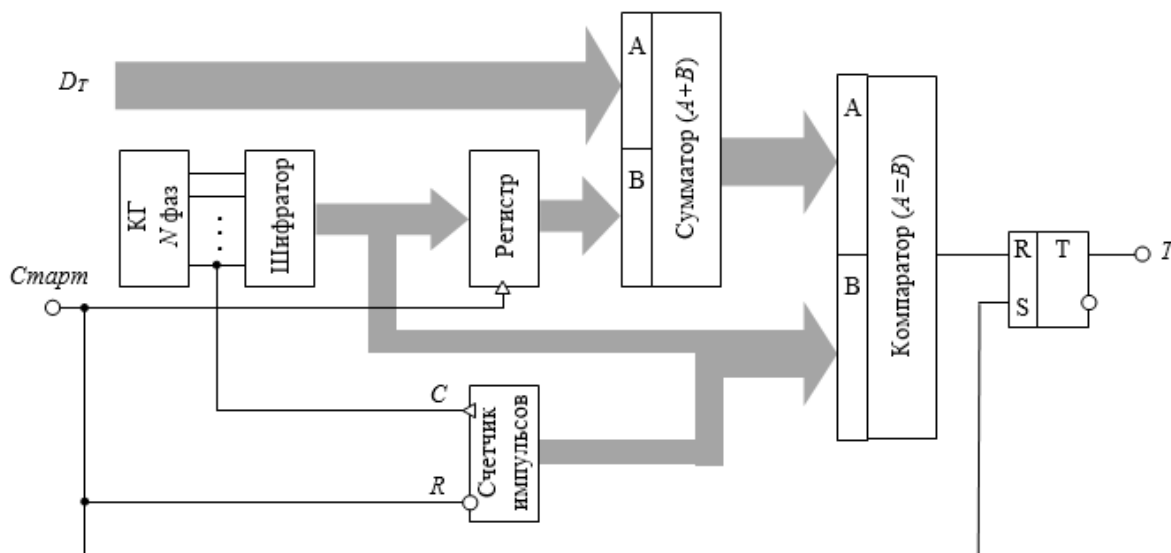


Рисунок 4 – Функциональная схема программируемого таймера

Обсуждение. Предложенный принцип формирования интервала времени отличается высокой точностью, которая ограничивается лишь разрядностью кольцевого генератора, которую можно увеличить с применением фазовой интерполяции для достижения субвентильного разрешения. Разрядность КГ при использовании каскадной интерполяции ограничена лишь шумовыми эффектами технологической и физической природы. Хотя предложенное устройство предполагает аналоговое ре-

гулирование времени задержки каскадов КГ, что недостижимо при проектировании устройства на базе программируемой вентильной матрицы, такой вариант исполнения все же возможен. Для этого по образцу аналога можно отказаться от стабилизации опорного периода, но предусмотреть непрерывное измерение частоты свободно работающего КГ. Такой вариант сопряжен с усложнением структуры и использованием полных функциональных возможностей матрицы для измерения текущей час-

тоты КГ, расчета на этой основе действительного и изменяющегося значения субкванта времени t_D и предварительного приведения численного значения задаваемого интервала к шкале актуального t_D .

Выводы. Рассмотрен новый подход к решению задачи формирования прецизионного интервала времени интегральным таймером с разрешающей способностью менее задержки логического вентиля, что на современном этапе развития микроэлектроники способно обеспечить погрешность интервала в несколько десятков пикосекунд. Предложенная структура таймера ориентирована на заказное интегральное исполнение, однако, при некотором усложнении с привлечением встроенных вычислительных возможностей программируемой пользователем вентильной матрицы может быть реализована в лабораторных условиях для решения конкретных измерительных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Рахтор Т.С. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. – М.: Техносфера, 2006. – 392 с.
2. Arai, Y. A time digitizer CMOS gate-array with a 250 ps time resolution / Y. Arai, M. Ikeno // IEEE Journal of Solid-State Circuits, – February 1996. – Vol.31, No.2, – P. 212-220.
3. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. – М.: Мир, 1990. – 536 с.
4. Porat, D.I. Review of sub-nanosecond time interval measurements / D.I. Porat // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1973. – Vol. NS-20, N. 5. – P. 36-51.
5. Шляндин, В.М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы. – М., Высшая школа. – 1973. – 280 с.
6. Чу, Фергюсон. Генераторы импульсов с разрешением 20 пс / Чу, Фергюсон // Электроника. – 1977. – N. 23. – С. 25-34.
7. Патент РФ 2173934, МКИ H03K 5/04. Устройство для формирования интервала времени / Чулков В.А. – 2000109989/09, Заявл. 18.04.2000; Опубл. 20. 09.2001.
8. Авт. свид. СССР 1221722, МКІ H03K 5/04. Устройство задержки. – Чулков В.А. – № 3644213/24-21, Заявл. 21.09.1983; Опубл. 30.03.1986.
9. GigaBaudics 10 Gb/s programmable delay line model PDDL10. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <http://gigabaudics.com/PDDL10/pddl10.html> (дата обращения 16.02.2025).
10. Чулков, В.А. Интерполирующие преобразователи время-код / В.А. Чулков // Автометрия. – 2008. – Т. 44, №6. – С. 116-127.
11. Чулков В.А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации. – М.: Физматлит, 2010. – 324 с.
12. Чулков В.А. Кольцевые генераторы импульсов в технике передачи и обработки сигналов. – Старый Оскол: ТНТ, 2023. – 240 с.
13. Чулков, В.А. Генераторы импульсов с фазовым субквантованием / В.А. Чулков // Известия вузов. Приборостроение. 2004, №8. – С.28-34.
14. Бутаев, М.М. Управляемые КМОП элементы задержки для интерполирующих преобразователей информации / М.М. Бутаев, В.А. Чулков // Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ. – 2010. – Вып.5. – С. 130-140.
15. Maharaptra, N.R. Comparison and Analysis of Delay Elements / N.R. Maharaptra, A. Tareen, S.V. Garimella // Pros. IEEE Computer Society Annual Workshop on VLSI (WVLSI 2000). – April 27-28, 2000. – Orlando, FL. – P. 81-86.
16. Cheng Jia. A delay-locked loop for multiple clock phases/delays generation / A Ph. D. Dissertation [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/7470/jia_cheng_200512_phd.pdf (дата обращения 04.04.2025).
17. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении. Пер. с англ. Под ред. Ю.Н.Бакаева и М.В.Капранова. – М.: Сов. Радио, 1978. – 598 с.
18. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации / В.В. Шахгильдян, А.А. Ляховкин, В.Л. Карякин; ред.: В.В. Шахгильдян. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1989. – 318 с.
19. Бутаев, М.М. Анализ точности интерполяции опорного периода системой автоподстройки задержки / М.М. Бутаев, В.А. Чулков // Анализ точности интерполяции опорного периода системой автоподстройки задержки. – Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ. – 2010. – Вып. 5, – С. 140-148.
20. Beek, R.C.H. On jitter due to Delay Cell Mismatch in DLL-based Clock Multipliers / R.C.H. Beek, E.A.M. Klumperink, C.S. Vaucher, B. Nauta // Proceedings of IEEE International Symposium On Circuits and Systems. – May 2002. – Vol. 2, – P. 396-399.
21. Чулков, В.А. Интерполирующий преобразователь время-код на п.л.и.с. / В.А. Чулков, А.В. Медведев // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 6. – С. 31-35.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 004.4'2

EDN: YJPBUN

ПОДХОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ, ПОЛУЧАЮЩИХ ОБНОВЛЕНИЯ НЕЗАВИСИМО ОТ МАГАЗИНОВ ПРИЛОЖЕНИЙ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3992-6024

AuthorID: 754564

ORCID: 0009-0002-2952-4302

МАКСИМОВ Ярослав Александрович, аспирант кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: iamyaroslavmaximov@yandex.ru)

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: 4065-2716

AuthorID: 1238968

ORCID: 0009-0002-8415-7146

КАСАТКИНА Елена Дмитриевна, студент

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: elenakasatkina860@gmail.com)

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, город Москва, ул. Ярославское ш., 26, e-mail: 043210@mail.ru)

Аннотация. В представленной статье рассматривается эволюция мобильных приложений, в частности, уделяется внимание гибридным мобильным приложениям и проблемам, с которыми сталкиваются разработчики при работе в условиях ограничений магазинов приложений. Выполнен ретроспективный обзор мобильных приложений, в котором отмечается стремительный рост индустрии, начавшийся с запуском в 2008 году магазинов приложений *Apple App Store* и *Google Play Market* для *Android*. Эти платформы заняли центральное место в мобильной системе, обеспечивая пользователям легкий доступ к миллионам приложений, но при этом предоставляя владельцам платформ значительный контроль над тем, какие приложения допускаются к использованию и каковы условия их включения. В статье описываются не только текущие тенденции и проблемы, с которыми сталкиваются разработчики мобильных приложений, но и предлагается подход к разработке таких приложений и инструментария, на основе которого они могут быть разработаны. В условиях постоянного изменения требований и алгоритмов магазинов приложений, разработка эффективных методов разработки мобильных приложений является чрезвычайно актуальной.

Ключевые слова: мобильное приложение, гибридное приложение, обновление, дистрибуция, андроид, разработка.

THE APPROACH FOR CREATING MOBILE APPLICATIONS RECEIVING THEIR UPDATES INDEPENDENTLY OF APP STORES

© The Authors 2025

MAXIMOV Yaroslav Alexandrovich, postgraduate student of Programming Department

Penza State Technological University

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

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)

KASATKINA Elena Dmitrievna, student

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baydukov Proyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: elenakasatkina860@gmail.com)

PANFILOVA Marina Ivanovna, candidate of technical sciences, docent,

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. This paper examines the evolution of mobile applications, focusing in particular on hybrid mobile applications and the challenges faced by developers when working within the constraints of app shops. A retrospective review of mobile applications is performed, highlighting the rapid growth of the industry that began with the launch of the *Apple App Store* and *Google Play Market* for Android in 2008. These platforms have taken centre stage in the mobile system, providing users with easy access to millions of apps, but also giving platform owners considerable control over what apps are allowed and the terms of their inclusion. This article describes not only the current trends and challenges faced by mobile application developers, but also suggests an approach to developing such applications and the tools on which they can be developed. With the constant changes in the requirements and algorithms of app shops, the development of effective methods of mobile app development is extremely relevant.

Keywords: mobile application, hybrid mobile application, mobile application update, mobile apps distribution, android, development.

Для цитирования: Максимов Я.А. Подход для создания мобильных приложений, получающих обновления независимо от магазинов приложений / Я.А. Максимов, А.И. Мартышкин, Е.Д. Касаткина, М.И. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 144-148. – EDN: YJPBUN.

Введение. Первые мобильные приложения появились в конце 90-х годов прошлого века. Они обладали простым функционалом и разрабатывались производителями телефонов, и поэтому поставлялись в комплекте с ними. Мир индустрии мобильных приложений, каким мы видим его сейчас, начал становиться с 2007 года с момента выпуска *iPhone 2G* и после того, как компания *Apple* представила концепцию магазина приложений, где пользователи могли легко искать, скачивать и устанавливать приложения. В 2008 году также был запущен *Android Market* (позднее переименованный в *Google Play Market*), что в итоге привело к тому, чтобы были созданы две основные платформы для распространения мобильных приложений (рис. 1).

В современном мире уже сложно представить жизнь без смартфонов и магазинов мобильных приложений, так как они помогают их пользователям решать рутинные задачи. Магазины приложений, такие как *Google Play Market* и *App Store*, являются монополистами в цифровом контенте гаджетов, предо-

ставляя пользователям удобный доступ к миллионам приложений [1, 2]. По этой причине данные магазины приложений могут запрещать обновлять приложения пользователям без какого-либо объяснения причин.

Однако с ростом числа их пользователей и доминированием отдельных разработчиков приложений все чаще поднимаются вопросы о монополизации рынка и ущемлении интересов других разработчиков. Указанные платформы обладают полной властью, контролируя рынок приложений, условия их распространения и размещенный на их платформах контент [3, 4]. Ввиду этого чужие приложения могут быть заблокированы без объяснения причин, что ограничивает конкуренцию, вынуждая компании подчиняться строгим правилам или проводить выплаты значительных комиссий.

Подобные ситуации вызывают опасения о свободе выбора пользователей, а также о будущем независимых разработчиков в условиях растущей монополии крупных цифровых платформ.

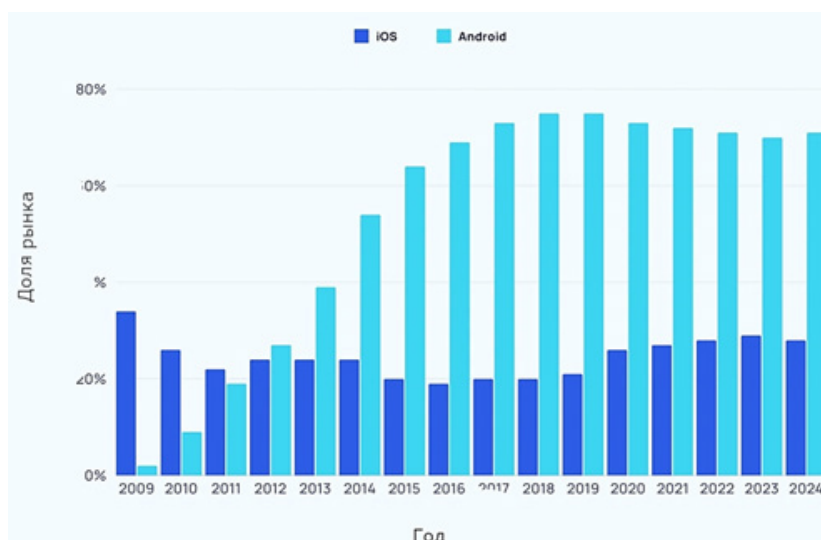


Рисунок 1 – Доля рынка iOS и Android приложений

Методология. Перед тем как попасть в магазин приложений, мобильные приложения проходят строгие проверки. Приложение загружается на платформу и затем проходит автоматизированную проверку на наличие вирусов и соответствие техническим требованиям. Далее команда модераторов проводит ручное тестирование приложения, оценивая его функциональность, пользовательский интерфейс и соответствие политике магазина. В случае выявления недостатков разработчику представляются рекомендации по корректировке продукта. После успешного прохождения всех этапов приложение публикуется в магазине и становится доступным для пользователей. Важно отметить, что такой процесс занимает продолжительное время, поэтому возможна ситуация, когда разработчики находятся в одной временной зоне, а тестировщики платформы – в другой, что увеличивает время ожидания заключения.

Пользователи, загрузившие приложение один раз, всегда могут иметь его копию на своем устройстве. Однако операционная система (ОС) *iOS* способна синхронизироваться со своими серверами, что приводит к удалению такого приложения в случае, если оно было удалено из той или иной платформы для размещения мобильных приложений. После удаления приложений из магазина их пользователи могут продолжать работать с ними, но не могут получать обновления. Диаграмма пользования таким приложением представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Работа с нативным мобильным приложением

Без постоянной поддержки и получения обновлений приложения уязвимы перед атаками и перестают корректно работать на новых версиях нативных ОС.

Однако современный инструментарий продвинулся настолько вперед в современном мире, что появилась возможность пересмотреть понятия мобильного приложения [5], особенно их разновидность – гибридные мобильные приложения, сочетающие в себе элементы веб-технологий и нативных платформ [6]. Как правило, разработка ведется с использованием инструментов *HTML*, *CSS* и *JavaScript*, а его запуск происходит в *WebView*, обернутым в оболочку, написанную на соответствующем платформе языке программирования. *WebView* является технологией, которая используется нативной ОС (например *Android* или *iOS*) для отображения веб-контента внутри нативного мобильного приложения [7]. Это позволяет работать с *HTML*, *CSS* и *JavaScript* [8], а также взаимодействовать между слоями через программные интерфейсы, предоставляемые ОС [9]. Схема такого взаимодействия представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Простое взаимодействие между *WebView* и ОС смартфона

С архитектурной точки зрения гибридное приложение работает на основе единой кодовой базы, которая и обеспечивает кроссплатформенную совместимость в отличие от полностью нативных приложений, созданных с использованием языков и инструментов, специфичных для каждой ОС (например, *Swift* для *iOS* или *Kotlin* или *Java* для *Android*) [4, 7]. Это позволяет хранить и выпускать обновления с использованием личного сервера, не полагаясь на магазин приложений. Это дает возможность в любой момент опубликовать изменения независимо от третьих сторон. Диаграмма пользования таким приложением представлена на рисунке 4.

Однако у такого подхода существуют и недостатки в виде проблем к доступу к нативным функциям устройства. Причина тому тот факт, что приложения, работающие в *WebView*, не имеют прямого доступа к аппаратным возможностям устройства [4]. Например, камера, *Bluetooth*, сенсоры, *GPS*, а также файловая система и использование многопоточной обработки [10,11]. Пример интегрирования веб-приложения в нативный слой представлен в листинге 1.

Листинг 1 – интегрирования веб-приложения в нативную оболочку:

```
public class MainActivity extends AppCompatActivity {
    private WebView webView;
    @Override
    protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
        super.onCreate(savedInstanceState);
        setContentView(R.layout.activity_main);
        webView = findViewById(R.id.webView);
        WebSettings webSettings = webView.getSettings();
        webSettings.setJavaScriptEnabled(true);
        webView.setWebChromeClient(new WebChromeClient());
        webView.setWebViewClient(new WebViewClient());
        webView.loadUrl("https://resource.ru/index.html"); //
        // загрузка веб-приложения
    }
}
```



Рисунок 4 – Работа с гибридным мобильным приложением

Результаты. Нативный код, представленный в листинге 1, работает с простым активити (*activity*), которое создается при старте любого проекта для мобильного приложения на ОС *Android*. *Activity* составляет основную часть любого *Android* приложения, с которой взаимодействует пользователь, то есть, по сути, это сам интерфейс. В разработке мобильных приложений для ОС *Android* активити – это специальный экран, в рамках которого происходит взаимодействие пользователя с приложением. При его инициализации создается *WebView*, которое загружает необходимое веб-приложение. Такой процесс будет повторяться при каждом его старте. Стоит отметить, что такие протоколы как *HTTP*, *HTTPS* и *FTP* могут использоваться при загрузке приложения [12-14].

Нативный мост предоставляет интерфейсы, через которые *JavaScript* код, работающий в *WebView*, может обращаться к нативному функционалу.

Схема работы обновленного подхода с использованием нативного моста представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Использование нативного моста в гибридном мобильном приложении

Обсуждение. Нативный мост позволяет выстроить двустороннюю связь. То есть коммуникация происходит между нативным слоем приложения и веб-слоем, а также в обратном направлении. Нативный слой может отправлять данные для отображения пользователю в веб-слой, а он в свою очередь может передавать данные нативному слою для последующей обработки. Это позволяет создавать более интерактивные и функциональные мобильные приложения, которые не зависят от магазинов приложений и максимально абстрагируются от нативной платформы [15-17]. Однако у данного подхода существуют и минусы в виде временных затрат на коммуникацию между слоями и обработкой таких событий [18-21]. Причиной такого эффекта является тот факт, что мост может обрабатывать события последовательно, а отправка самих событий между слоями занимает гораздо больше времени из-за *JSON*-сериализации и десериализации каждого сообщения.

Выводы. В заключение следует подчеркнуть, что гибридные мобильные приложения и нативные мосты представляют собой современный эффективный инструмент разработки программного обеспечения, предоставляя максимальную гибкость и кроссплатформенную совместимость, а также доступность в условиях, когда невозможно доставить обновления для мобильного приложения. Нативные мосты способны обеспечить двустороннее взаимодействие между нативным слоем ОС и веб-контентом. Предлагаемый подход расширяет функциональные возможности гибридных приложений, позволяя использовать преимущества веб-технологий наряду с доступом к аппаратным ресурсам устройства для разработки гибридных мобильных приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Михеев, М.Ю. Базовые тенденции развития мобильных приложений в рамках концепции информационной экосреды / М.Ю. Михеев, А.С. Попченков, И.А. Крохин //

Современные информационные технологии. – 2022. – № 36. – С. 97-100.

2. Власенко, А.О. Тенденции развития мобильных приложений / А.О. Власенко, А.Д. Гузнова, А.А. Прокин // E-Scio. – 2023. – № 5 (80). – С. 387-395.

3. Абдуллаев, Э.А. Развитие мобильных приложений и их будущее // Молодой ученый. – 2024. – № 5(504). – С. 17-18.

4. Васильев Н.П., Заяц А.М. Введение в гибридные технологии разработки мобильных приложений: учебное пособие для ВО. – СПб.: Издательство «Лань», 2020. – 160 с.

5. Мэннинг Д., Баттфилд-Эддисон П. Head First. Изучаем Swift / Пер. с англ. Е. Матвеева. – СПб.: Питер, 2023. – 400 с.

6. Пацей, Н.В. Разработка мобильных приложений. Учебно-методическое пособие. – Минск: БГТУ, 2020. – 265 с.

7. Мартышкин, А.И. Обзор наиболее популярных мобильных приложений для изучения языка программирования Swift / А.И. Мартышкин, А.В. Коленчук, А.В. Новиков, Е.Г. Бершадская // Современные информационные технологии. – 2023. – № 38 (38). – С. 117-119.

8. Школьников, В.С. Разработка интерактивной веб-платформы для образовательных викторин с использованием HTML, CSS, JavaScript // Молодёжная наука Севера: сборник материалов I Международной научно-практической конференции. В 3-х частях. Ханты-Мансийск, 2023. – С. 354-361.

9. Максимов, Я.А. Работа выделения памяти для JavaScript на примере браузерного движка V8 / Я.А. Максимов, А.И. Мартышкин // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 6. – С. 40-46.

10. Мартышкин, А.И. Примитивы синхронизации в многопоточных приложениях / А.И. Мартышкин, А.А. Зоткина // Современные информационные технологии. – 2022. – № 35 (35). – С. 14-16.

11. Никишин, И.К. Современные встраиваемые вычислительные системы: реализация, достоинства и недостатки / И.К. Никишин, А.И. Мартышкин // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39(39). – С. 172-176.

12. Максимов, Я.А. Развертывание современных веб-приложений / Я.А. Максимов, Е.А. Гудкова // Современные информационные технологии. – 2020. – № 32 (32). – С. 69-71.

13. Яремчук, А.В. Роль современных методов хранения клиентских данных // Научно-исследовательский центр "Science Discovery". – 2024. – № 17. – С. 80-84.

14. Мартышкин, А.И. Программное средство тестирования и анализа трафика UDP канала сетей реконфигурируемых распределенных вычислительных систем / А.И. Мартышкин, Е.А. Данилов, С.А. Раздобудов // Современные информационные технологии. – 2023. – № 37(37). – С. 109-112.

15. Максимов, Я.А. Возможности оптимизации производительности веб-приложений // Современные информационные технологии / Я.А. Максимов, А.И. Мартышкин // Современные информационные технологии. – 2024. – № 39 (39). – С. 189-192.

16. Малявин, М.Ю. Оценка производительности веб-приложений: современные методы и инструменты // Современное программное обеспечение, математическое моделирование и обеспечение информационной безопасности в компьютерных системах и комплексах: сборник научных статей аспирантов. Москва, 2024. – С. 31-36.

17. Мартышкин, А.И. Проблемы измерения производительности в современных клиент-серверных веб-приложениях / А.И. Мартышкин, Я.А. Максимов // Современные информационные технологии. – 2023. – № 37 (37). – С. 105-109.

18. Бондаренко, О.С. Сравнительный анализ современных методов рендеринга веб-приложений и их влияния на производительность / О.С. Бондаренко, А.А. Смирнов, В.С. Вдовин // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2024. – Т. 9. – № 6 (44). – С. 113-121.

19. Чернецкий, И.И. Исследование влияния Layout Thrashing на производительность веб-приложений и методы по его оптимизации // Universum: технические науки. – 2023. – № 12-2 (117). – С. 31-35.

20. Чигуров, М.Е. Нагрузочное тестирование приложений с использованием JMeter / М.Е. Чигуров, И.Г. Курмашев // Молодежь и наука-2024: двигатель настоящего

и залог успешного будущего: материалы Международной научно-практической конференции. Петропавловск, 2024. – С. 244-251.

21. Максимов, Я.А. Обзор современных программных решений в области измерения производительности клиентской части веб-приложений / Я.А. Максимов, А.И. Мартышкин // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 12-2. – С. 348-354.

Статья поступила в редакцию 15.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 629.05, 629.4.067

EDN: WODMOV

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9528-4823

AuthorID: 916989

ORCID: 0000-0002-2863-5863

ОХОТНИКОВ Андрей Леонидович, заместитель начальника Департамента информационных технологий,
начальник отдела стратегического развития

*АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации,
автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»*

(107078, Россия, город Москва, Орликов переулок, д.5, стр.1, e-mail: a.ohotnikov@yniias.ru)

SPIN: 6496-9373

AuthorID: 35235181200

ORCID: 0000-0002-5246-841X

ResearcherID: N-4421-2017

СОКОЛОВ Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор,
заведующий научно-производственной лабораторией

Ростовский государственный экономический университет

(344002, Россия, город Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 69, e-mail: s.v.s.888@yandex.ru)

SPIN: 6554-9950

AuthorID: 353693

ORCID: 0000-0002-0902-0492

ScopusID: 57200151672

КОСТЮКОВ Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент,
начальник отдела докторантуры и аспирантуры

Ростовский государственный университет путей сообщения

*(432700, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2,
e-mail: kav@rgups.ru.)*

Аннотация. На современном этапе развития транспортного комплекса большое внимание уделяется разработкам современного и безопасного подвижного состава, а также системам управления беспилотными транспортными средствами. Беспилотные железнодорожные системы оборудованы современными техническими устройствами анализа и управления, которые позволяют выявлять препятствия по ходу движения поезда, анализировать и принимать быстрые и правильные решения по обеспечению безопасных условий его движения, а также находить оптимальные режимы движения с учётом безопасности и энергосбережения. Также следует по возможности исключить человеческий фактор при принятии решения в экстренных ситуациях и учесть нормативы рабочего времени для машинистов подвижного состава, что снижает непроизводительные затраты и повышает безопасность движения. Основным элементом, позволяющим осуществлять мониторинг окружающего пространства при движении, является система технического зрения, которая должна обнаруживать опасные объекты-препятствия на рельсовом пути с максимально точным и быстрым решением по выбору режима движения и осуществления служебного или экстренного торможения во избежание наезда на препятствие для предотвращения негативных последствий. Одновременно, работа системы технического зрения должна минимизировать вероятность пропуска сигнала о препятствии и ложной тревоги, так как ложные срабатывания приводят к неоправданным остановкам поезда, перерасходу тяговых ресурсов и срыву графика движения поездов, а пропуск сигнала – к авариям.

Ключевые слова: автоматическое управление, цифровая модель, путь, бортовая система, техническое зрение, мобильная система, позиционирование, дронопорт.

THE CONCEPT OF BUILDING INTEGRATED MANAGEMENT SYSTEMS BY UNMANNED RAILWAY TRANSPORT

© The Author(s) 2025

OKHOTNIKOV Andrey Leonidovich, deputy head of the Department of Information Technology,
head of the Department of Strategic Development

*JSC «Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport»
(107078, Russia, Moscow, Orlikov Pereulok, 5, building 1, e-mail: a.ohotnikov@yniias.ru)*

SOKOLOV Sergey Viktorovich, doctor of technical sciences, professor,
head of the Scientific and Production Laboratory

Rostov State University of Economics

(344002, Russia, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 69, e-mail: s.v.s.888@yandex.ru)
KOSTYUKOV Alexander Vladimirovich, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Doctoral and Postgraduate Studies
Rostov State Transport University
(432700, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia Square, bldg. 2,
e-mail: kav@rgups.ru.)

Abstract. At the present stage of development of the transport complex, much attention is paid to the development of modern and safe rolling stock, as well as control systems for unmanned vehicles. Unmanned vehicles are equipped with modern technical analysis and control devices that allow identifying obstacles along the train, analyzing and making quick and correct decisions to ensure safe conditions for the movement of rolling stock, as well as finding optimal driving modes taking into account safety and resource conservation. It is also necessary to take into account the exclusion of the human factor when making decisions in emergency situations and the implementation of working time standards for rolling stock drivers, which reduces non-production costs and improves traffic safety. However, unmanned vehicles are subject to a number of strict requirements, the main task of the unmanned train control system is to ensure the safety of passengers and cargo. The main element that allows monitoring the surrounding space during the movement of rolling stock is the technical vision system. Machine vision systems for rail transport must meet high safety requirements for detecting dangerous objects-obstacles on the track with the most accurate and fast decision for choosing the mode of movement and implementing service or emergency braking to avoid hitting an obstacle and preventing negative consequences. At the same time, the operation of the machine vision system must minimize the probability of missing a signal about an obstacle and a false alarm, since false alarms lead to unjustified stops of the train, overuse of traction resources and disruption of the train schedule, and missing a signal - to accidents.

Keywords: automatic control, digital model, path, on-board system, technical vision, mobile system, positioning, droneport.

Для цитирования: Охотников А.Л. Концепция построения интегрированных систем управления беспилотным железнодорожным транспортом / А.Л. Охотников, С.В. Соколов, А.В. Костюков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 149-154. – EDN: WODMOV.

Введение. В современных условиях для решения задач управления беспилотным подвижным составом используют определенный класс сложных технических систем [1], анализирующих информационную ситуацию в системах автоматического управления [2], известных как «системы технического зрения» (СТЗ) и «высокоточные системы позиционирования» (ВСП). Эти системы необходимы для расчета параметров движения подвижного состава в автоматическом режиме. В целях повышения безопасности движения поездов, в частности, для предотвращения столкновения поезда с препятствием, оправдано совместное использование СТЗ и ВСП.

В настоящее время СТЗ и ВСП находят широкое применение в различных транспортных сферах – на автомобильном, воздушном, морском, железнодорожном [3-5] и городском транспорте [6], а также в авиации и космонавтике [7]. Особенностью применения средств технического зрения и позиционирования на железнодорожном транспорте является высокая ответственность за пассажиров и грузы, а также тяжесть последствий, которые могут быть вызваны возможными авариями. Поэтому актуальным является предметное изучение опыта применения технологий и технических средств в указанных транспортных сферах для оптимизации конфигурации системы, обеспечивающей при соразмерных затратах финансовых и технических средств качественное и эффективное решение задач для различных видов транспорта. Транспортный объект

в общем случае перемещается в своей среде (вода, земля, воздух, космос) из одной точки пространства в другую и находится под постоянным контролем оператора посредством телекоммуникационной системы (автоматизированное управление), либо автономных СТЗ и ВСП – в автоматическом режиме [8].

Рассматривая место систем технического зрения и позиционирования в составе бортового и инфраструктурного комплекса, можно отметить их достаточно сложную структуру, а также тесную интеграцию с системами управления и обеспечения безопасности. Особая значимость применения СТЗ и ВСП на железнодорожном транспорте обусловлена внедрением цифровых технологий управления движением поездов. К таким технологиям относятся беспилотное (автоматическое) ведение поездов, интевальное регулирование движения поездов, автоматизацию и роботизацию станционных процессов. Критериями эффективности управления движением поездов служат пропускная и провозная способности, безопасность движения, комфортность перевозки пассажиров и своевременность доставки грузов благодаря точному выполнению графика движения поездов [9], экономии расхода энергии и целесообразного распределения времени хода на перегонах [10].

СТЗ и ВСП включают большое количество датчиков для получения значительного объема обрабатываемой информации, что характерно, в частности, для видеокамер и лидаров высокого разрешения. Поток информации, генерируемый дат-

чиками СТЗ и ВСП, часто связывают с понятием *Big Data* («большие данные») [11]. Проблема обработки и анализа большого объема данных в реальном времени связана с выбором и эффективным применением методов обработки этих данных. Решение проблемы «больших данных» требует создания как интеллектуальных транспортных систем, так и киберфизических транспортных систем, объединяющих в себе собственно транспортные объекты, инфраструктурные объекты с СТЗ и ВСП, а также телекоммуникационные системы [12-15]. Готовых решений по объединению таких систем с определением их оптимальной структуры и применяемых алгоритмов не существует.

Методология. Целью настоящей работы является обоснование концепции интеграции СТЗ и ВСП в системах автоматического управления беспи-

лотного железнодорожного транспорта.

В условиях автоматического управления поезда с постоянным повышением скоростей и увеличением объема обрабатываемой информации особенно важна задача предотвращения его столкновения со случайными объектами, появляющимися на пути следования. Это могут быть животные, люди, транспортные средства, упавшие грузы, деревья и прочие объекты. Для СТЗ часто необходимо не только своевременное определение, но и точная идентификация препятствия для изменения режима движения поезда. На такие задачи нацелены искусственные нейронные сети, выбор и работа которых рассмотрены в работах [16-18].

Также важно правильно оценивать расстояние до препятствия с учетом погрешностей датчиков СТЗ и ВСП (рис. 1, 2).



Рисунок 1 – Система технического зрения на электропоезде ЭС2Г-136



Рисунок 2 – Стационарные системы технического зрения в зонах повышенной опасности

Отдельной задачей ставится расширение границ наблюдаемости в местах ограниченной видимости, где бортовые системы безопасности не способны определять и распознавать препятствия и, тем самым, уменьшить неопределенность [19] в быстроизменяющихся условиях функционирования объекта управления при воздействии различных дестабилизирующих факторов. В последнее время расширились масштабы применения мобильных СТЗ, включающих в себя беспилотные авиационные системы и базовые станции для их зарядки и хранения (дропопорты), а также облачных платформ для формирования полетных заданий беспилотных авиационных систем [20]. Область действия таких мобильных СТЗ достигает 10 км, а температурный

диапазон использования – от -40 до $+50$ градусов. Дропопорты устанавливают в местах, где стационарные СТЗ строить либо не выгодно, либо они используются нерегулярно. Облет беспилотных авиационных систем осуществляется по расписанию движения поездов. При подходе поезда к опасному участку дрон взлетает и движется по установленному маршруту. В случае обнаружения объекта-препятствия вычислитель беспилотной авиационной системы определяет координаты объекта и передает их на борт подвижного состава, либо сообщает диспетчеру через каналы цифровой связи. После облета маршрута дрон возвращается на базу и подзаряжает свои аккумуляторы для дальнейших вылетов (рис. 3).



Рисунок 3 – Мобильная система технического зрения (дропоорт беспилотной авиационной системы)

Результаты. Данное объединение инфраструктурных и бортовых систем существенно расширяет горизонт наблюдаемости при движении поезда, особенно на участках повышенной опасности, где бортовые СТЗ не могут решать свои задачи из-за кривизны или уклона участка, а стационарные СТЗ невозможно установить из-за отсутствия источников питания. Такая интеграция в итоге повышает точность и надежность приема, обработки и интерпретации сенсорных данных, повышает функциональную безопасность применяемых систем управления движением поездов. Поэтому СТЗ, обладающую такими свойствами, можно назвать интегрированной системой технического зрения. Помимо СТЗ для систем автоматического управления движением поезда важное значение имеет точное позиционирование транспортных объектов с применением ВСП, включающих глобальные навигационные спутниковые системы и навигационную аппаратуру потребителей в составе приемников и передатчиков навигационной информации; датчиков пути и

скорости, бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Последние включают в себя микромеханические акселерометры и гироскопы, а также цифровые модели пути [21]. Блоки обработки сенсорных данных от датчиков СТЗ чаще всего используют алгоритмы *SLAM* (*Simultaneous Localization And Mapping*) [22] для локализации и построения электронной карты местности с одновременным контролем текущего местоположения и пройденного пути. Также датчики СТЗ используются в задачах визуальной, лидарной, радиолокационной одометрии при позиционировании и ориентации транспортных объектов (рис. 4).

Таким образом, объединение (интегрирование) СТЗ и ВСП является перспективным решением задачи для автоматического управления движением поездов и может применяться как для маневровых передвижений локомотива на цифровых железнодорожных станциях, так и для электропоездов крупных агломераций, где стоит задача построения интеллектуальной транспортной системы с управлением

поездами-роботами без участия человека. Термин «интегрированная» в данном случае означает объединение различных типов СТЗ с системой высокоточного позиционирования, обеспечивающее автономную обработку сенсорных данных бортовым и инфраструктурным вычислителями для принятия консолидированного решения в центре по автоматическому управлению движением поезда или на борту поезда.

Это позволяет с необходимым быстродействием и высокой вероятностью определения препятствий обеспечить требуемый уровень безопасности движения поезда, управляемого в автоматическом режиме.



Рисунок 4 – Состав программно-аппаратного комплекса высокоточной системы позиционирования

Обсуждение. Несмотря на активные разработки в области создания систем автоматического управления движением поездов на базе СТЗ и ВСП, остается множество вопросов, требующих скорого решения. Так, в связи с большим количеством и многообразием на мировом рынке электронных компонентов и устройств для СТЗ, появилась проблема выбора технических средств для СТЗ на железнодорожном транспорте. Причем, эта задача конкретизируется для каждого типа подвижного состава (маневровых, магистральных, электропоездов) в зависимости от стоящих перед ним функциональных целей и задач. Вариант решения подобной задачи описан в [23].

Состав аппаратных средств для каждого случая выбирается разработчиком на основании собственного опыта и видения задачи, однако возможно и автоматизированное ее решение для различных типов подвижного состава, которые позволят наилучшим образом определять препятствия с необходимой точностью и достоверностью в ситуации, в которой обычно используется данный тип подвижного состава [24]. Например, для маневрового локомотива важны параметры определения препятствий при малой скорости и ограниченной дальности (до 50 – 100 м), кривая торможения такого типа подвижного состава достаточно мала, при этом времени на принятие решения по управлению вполне достаточно. Для скоростных электропоездов актуальна дистанция для принятия решения до 600 м, а для магистральных локомотивов, которые перевозят грузы и пассажиров, важна дальность работы датчиков сканирования пространства до 1,5-2 км, так как тормозной путь таких поездов достаточно большой и часто превышает 1 км. Особенные требования должны предъявляться

к СТЗ высокоскоростных поездов, скорость движения которых может достигать 300 км/ч и выше. Соответственно кривая торможения в этом случае может составлять более 1,5-2 км и ответственность за скорость принятия решений в таких случаях резко возрастает, поэтому повышаются и требования к быстродействию датчиков СТЗ.

Выводы. Задача безопасного управления подвижным составом предполагает своевременное торможение при точном определении препятствия до прохождения точки невозврата, когда остановить поезд без последствий уже невозможно. Следует признать, что окончательно не изучены и не определены методы обработки данных для определения препятствий на пути следования подвижного состава, не сформулированы требования к ним. Выбор и сравнение аппаратных средств и алгоритмов обработки и анализа данных от датчиков для управления беспилотным поездом требует решения ряда сложных научно-технических задач. В частности, необходимо обеспечить требуемый уровень оперативности (минимизации времени) при проведении вычислений и принятии решения с учетом допустимых ошибок и погрешностей при обнаружении и сопровождении объектов-препятствий на рельсовом пути. Действующие полигоны для отработки беспилотного управления на железнодорожном транспорте располагаются, в основном, на выделенной инфраструктуре, где вероятность появления на путях посторонних объектов мала. Современные задачи исследования должны ориентироваться на автоматизацию управления движением поездов на магистральных, пригородных и городских железнодорожных ли-

ниях, где железнодорожная инфраструктура еще не защищена достаточно и не гарантирует отсутствие выхода человека, животного или автотранспорта на рельсовую колею. До настоящего времени в нашей стране решению перечисленных задач железнодорожного транспорта не уделялось должного внимания, а текущие разработки и исследования находятся в начальной стадии. Только в комплексе решая эти задачи. Можно добиться необходимого и достаточного уровня безопасности при управлении поездом,двигающимся в полностью автоматическом режиме, чему способствует интеграция СТЗ и ВСП в едином комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Назмудинов, И.С. Анализ моделей функционирования сложных технических систем с учетом применения различных управляемых систем / И.С. Назмудинов, П.А. Федонин, Д.В. Ведишев // Информатика: проблемы, методология, технологии: Сборник материалов XVIII международной научно-методической конференции: в 7 томах, Воронеж, 08-09 февраля 2018 года / Под редакцией Н.А. Тюкачева. Том 6. – Воронеж: научно-исследовательские публикации, 2018. – 227 с. – ISBN 978-5-9500319-2-2. – EDN XYSWPZ.
2. Попов, А.К. Элементы теории автоматического управления: учебное пособие / А.К. Попов, А.К. Попов // Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Московский гос. ин-т радиотехники, электроники и автоматики (технический ун-т)». – Москва: МИРЭА. – 2010. – 184 с. – ISBN 978-5-7339-0718-5. – EDN QMVGAT.
3. Охотников, А.Л. Виды систем технического зрения, применяемые на железнодорожном транспорте / А.Л. Охотников // Наука и технологии железных дорог. – 2020. – Т. 4. – № 4(16). – С. 77-87. – EDN CENEYK.
4. Domanov, K. Approaches to Creating a Driver Decision Support System for Digital Analysis of Railway Infrastructure Based on Machine Learning and Machine Vision Algorithms / K. Domanov, S. Istomin, A. Shatokhin // E3S Web of Conferences: Proceedings of the 2nd International Conference on High-Speed Transport Development (HSTD 2023). – Moscow, 29 августа 2023 года. – Vol. 446. – Les Ulis: EDP Sciences – Web of Conferences. – 2023. – P. 05001. – DOI 10.1051/e3sconf/202344605001. – EDN RSLDTF.
5. Kim Ju.Y. Deep Learning based Object Detection Method and its Application for Intelligent Transport Systems / Ju.Y. Kim, S.H. Kim // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. – 2021. – Vol. 27, № 12. – P. 1016-1022. – DOI 10.5302/j.icros.2021.21.0145. – EDN PRXYTE.
6. Multiple Hypothesis Detection and Tracking Using Deep Learning for Video Traffic Surveillance / H.A. Abdelali, H. Derrouz, Ya. Zennay [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 164282-164291. – DOI 10.1109/access.2021.3133529. – EDN GSMVZF.
7. Агеев, А.М. Место и роль систем технического зрения в авиации Воздушно-космических сил / А.М. Агеев, В.В. Проценко // Военная мысль. – 2020. – № 8. – С. 86-91. – EDN PAKKAZ.
8. Охотников А.Л. Транспортный объект как элемент системы автоматического управления / А.Л. Охотников // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6, № 3(23). – С. 45-52. – EDN QSXLME.
9. Бадажков, М.А. Энергоэффективность существующего графика движения поездов. Решения по оптимизации / М.А. Бадажков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 134-138. – EDN YSYRBF.
10. Баранов Л.А. Новая структура системы автоматического управления скоростью движения грузового электровоза / Л.А. Баранов, А.Н. Савоскин, О.Е. Пудовиков // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 4. – С. 70-78. – EDN MBUKHJ.
11. Данилов К.В., Капустин Н.И. Технологии Big Data в железнодорожной отрасли инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 4 (4). – С. 25-33. – EDN YPPXWW.
12. Селиверстов, С.А. Обзор развития интеллектуальных транспортных систем / С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов, О.Ю. Лукомская // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 6 (60). – С. 84-91. – EDN XIQYTT.
13. Cooper Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review / Z. Xiong, H. Sheng, W. Rong [et. al.] // Science China Information Sciences. – 2012. – Vol. 55, Issue 12. – P. 2908-2914. – DOI: 10.1007/s11432-012-4725-1.
14. Error correction algorithms in on-board intelligent transport data transmission systems / K. Goloskokov, V. Korotkov, A. Nyrkov, T. Knysh // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15-16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual. – 2021. – P. 012097. – DOI 10.1088/1742-6596/2061/1/012097. – EDN PYBFNF.
15. Селиверстов, С.А. О построении интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса / С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2015. – № 2-3(217-222). – С. 139-161. – DOI 10.5862/JCSTCS.217-222.12. – EDN TZGOXR.
16. Патент № 042033. Бортовая система технического зрения локомотива для определения и идентификации препятствий: заявл. 04.02.2022: опубл. 29.12.2022 / А.Л. Охотников, И. Н. Королев, И.А. Дейлид [и др.]; заявитель Открытое Акционерное Общество «Российские Железные Дороги» (ОАО «РЖД»). – EDN NSNXPL.
17. Ольшанский, А.М. Об одном варианте применения ИНС для управления интеллектуальными транспортными системами / А.М. Ольшанский // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы II Международной научно-практической конференции, Москва, 25 мая 2023 года. – Москва: Российский университет транспорта. – 2023. – С. 304-310. – DOI 10.30932/9785002182794-2023-304-310. – EDN CPCUCW.
18. Suci, D.A. Low-Cost Autonomous Trains and Safety Systems Implementation, using Computer Vision / D.A. Suci, E.H. Dulf, L. Kovács // Acta Polytechnica Hungarica. – 2024. – Vol. 21, No. 9. – P. 29-43. – DOI 10.12700/aph.21.9.2024.9.3. – EDN NHQGCK.
19. Елсуков, П.Ю. Информация, уменьшающая неопределенность и информация, увеличивающая содержательность / П.Ю. Елсуков // Образовательные ресурсы и технологии. – 2017. – № 3(20). – С. 62-68. – DOI 10.21777/2500-2112-2017-3-62-68. – EDN ZSUNPX.
20. Волков, В.А. Построение маршрута беспилотного летательного аппарата в задачах мониторинга и наблюдения / В.А. Волков, В.В. Печенкин // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Материалы XIX Международной научно-практической конференции. – 13-14 апреля, 2023 года. – Саратов: ИЦ «Наука». – 2023. – С. 613-618. – EDN RGGQTT.
21. Якушев, Д.А. Цифровая модель пути для беспилотного управления движением поездов / Д.А. Якушев // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 4. – С. 35-39. – DOI 10.34649/AT.2021.4.4.005. – EDN PMBBLM.
22. Комбинированный способ решения навигационной задачи с применением системы технического зрения / А.В. Савкин, Л.А. Колганов, Д.А. Антонов [и др.] // Приборы. – 2023. – № 10 (280). – С. 19-30. – EDN SVBHWS.
23. Охотников, А.Л. Алгоритм выбора оборудования для систем технического зрения на железнодорожном транспорте / А.Л. Охотников // Наука и технологии железных дорог. – 2021. – Т. 5, № 1(17). – С. 65-74. – EDN TWRACV.
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618100 Российская Федерация. Программа для выбора аппаратных средств системы технического зрения тягового подвижного состава: № 2022617579; заявл. 28.04.2022; опубл. 28.04.2022 / А.Л. Охотников, С.В. Мальцев, П.А. Попов, П.Д. Мыльников; заявитель АО «НИИАС». – EDN ZULIFY.

Статья публикуется в соответствии с
Госзаданием №1023080200012-3-2.3.4.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025
Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 664

EDN: DMJKYF

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ
И БЕЗОПАСНОСТЬ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И ИНГРЕДИЕНТОВ**

©Автор(ы) 2025

SPIN: 2551-2375

AuthorID: 482628

ORCID: 0000-0002-9146-6951

ШКОЛЬНИКОВА Марина Николаевна, доктор технических наук,
профессор кафедры Технологии питания*Уральский государственный экономический университет**(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru)*

SPIN: 4621-3360

AuthorID: 571351

ORCID: 0000-0002-3982-9700

РОЖНОВ Евгений Дмитриевич, доктор технических наук,
профессор кафедры биотехнологии и инжиниринга,*Уральский государственный экономический университет**(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: e.d.rojnov@usue.ru)*

ORCID: 0009-0001-2297-4637

КВАРДИН Василий Вячеславович, аспирант кафедры технологий питания
*Уральский государственный экономический университет**(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: vasyakvardin@yandex.ru)*

ORCID: 0009-0009-4275-5069

ПАСЕДКИНА Анна Николаевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры биотехнологии
*Бийский технологический институт (филиал)**Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова**(659300, Россия, Бийск, ул. Трофимова, 27, e-mail: pasedkina.an@bti.secna.ru)*

Аннотация. Цель исследования – проанализировать влияние ультразвукового воздействия различной интенсивности на свойства и безопасность пищевого сырья, пищевых продуктов и ингредиентов. Задачи: проанализировать применение ультразвуковых колебаний различного диапазона частоты в пищевой промышленности, систематизировать актуальные научные данные по применению ультразвукового воздействия различной интенсивности по видам пищевых продуктов, проанализировать влияние ультразвуковой модификации на свойства и безопасность пищевого сырья, пищевых продуктов и ингредиентов. При выполнении работы использовали научные методы: поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение. Поиск осуществляли в общедоступных ресурсах: электронных базах данных *Elibrary*, *Ciberleninka*, *Академия Google*, глубина поиска с 2016 по 2025 гг. Ультразвуковая обработка является энергоэффективной нетермической обработкой, обычно используемой для интенсификации таких процессов, как синтез, экстракция и сохранение пищевых продуктов и ингредиентов. Обобщены данные по применению ультразвука для модификации пищевого сырья, ингредиентов и систем. Показано, что ультразвуковое излучение вызывает изменения физических, биохимических и механических свойств, способствуя повышению пищевой ценности, улучшению технологических свойств пищевых ингредиентов, органолептических свойств и увеличению срока хранения пищевых продуктов. Установлены преимущества использования ультразвука в пищевых технологиях, основные из которых: сокращение энергозатрат, экологичность, интенсификация производственных процессов и увеличение выхода целевого продукта.

Ключевые слова: ультразвуковое воздействие, кавитация, интенсивность, пищевые продукты и ингредиенты, безопасность, потребительские свойства.

**EFFECT OF ULTRASONIC EXPOSURE ON FOOD VALUE AND SAFETY
OF FOOD PRODUCTS AND INGREDIENTS**

© The Author(s) 2025

SHKOLNIKOVA Marina Nikolaevna, doctor of technical sciences, docent,
professor of the Nutrition Technology Department*Ural State Economic University**(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45, e-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru)***ROZHN OV Evgeniy Dmitrievich**, doctor of technical sciences, professor of the Department of Food Engineering
*Ural State Economic University**(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45, e-mail: e.d.rojnov@usue.ru)***KVARDIN Vasily Vyacheslavovich**, postgraduate student of the Department of Food Technologies

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45, vasyakvardin@yandex.ru)

PASEDKINA Anna Nikolaevna, associate professor of the Department of Biotechnology

Biysk Technological Institute (branch) Altai State Technical University

(659300, Russia, Biysk, Trofimova St., 27, e-mail: pasedkina.an@bti.secna.ru)

Abstract. This study systematically evaluates how variable-intensity ultrasound treatment modulates the structural, functional, and safety profiles of food substrates – from raw materials to processed ingredients. By cataloging frequency-specific applications across food sectors and synthesizing contemporary research (2016-2025), it delineates intensity-dependent effects on diverse product categories. The methodology integrates bibliometric mining of Elibrary, CyberLeninka, and Google Scholar with critical data extraction, meta-analytic mapping, and evidence triangulation to establish ultrasound-processing-attribute relationships. Ultrasonic treatment is an energy-efficient non-thermal treatment commonly used to intensify processes such as synthesis, extraction and preservation of food products and ingredients. Data on the use of ultrasound for modification of food raw materials, ingredients and systems are summarized. It has been shown that ultrasound radiation causes changes in physical, biochemical and mechanical properties, contributing to an increase in nutritional value, improvement of technological properties of food ingredients, organoleptic properties and increase in the shelf life of food products. The advantages of using ultrasound in food technologies have been established, the main ones being: reduction of energy costs, environmental friendliness, intensification of production processes and increase in the yield of the target product.

Keywords: ultrasonic action, cavitation, intensity, food products and ingredients, safety, consumer properties.

Для цитирования: Школьников М.Н. Влияние ультразвукового воздействия на пищевую ценность и безопасность пищевых продуктов и ингредиентов / М.Н. Школьников, Е.Д. Рожнов, В.В. Квардин, А.Н. Паседкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 155-161. – EDN: DMJKYF

Введение. В настоящее время с понятием «ультразвук» связано не только обозначение высокочастотного спектра акустических волн, но гораздо больший смысл имеют современные приложения, включающие всё новые области техники: современную физику, информационную, измерительную технику, медицину, биологию, сонохимию, а также технологию продуктов питания и ингредиентов. Ультразвук состоит из механических звуковых волн, возникающих из молекулярных движений и колеблющихся в среде распространения. При распространении в газах, жидкостях и твердых телах ультразвук порождает уникальные явления, многие из которых нашли практическое применение в промышленности. В различных диапазонах частот (5-10 кГц) возникают многочисленные физико-химические явления, способствующие усилению диффузных, осмотических, сорбционных, ферментативных процессов, диспергированию частиц. Применение ультразвука в пищевой промышленности позволяет получать продукты высокого качества, интенсифицировать многие процессы без термической обработки и сократить продолжительность процессов, по сравнению с традиционными технологиями [1].

Приоритетное направление развития индустрии питания – использование «зеленых» технологий, основанных на принципах экологичности, безопасности и минимизации продовольственных потерь, чему в полной мере соответствует ультразвуковая обработка, как одна из высокоэффективных технологий получения сырьевых ингредиентов. Следует отметить тот факт, что для наиболее распространенных методов тепловой обработки пищевого сырья

характерна высокая энергоемкость процесса [2]. Так, обычные процессы консервирования при высокой температуре, несмотря на высокую эффективность снижения микробной нагрузки, приводят к потере термолабильных питательных веществ, протеканию нежелательных процессов, изменению текстуры и других органолептических свойств продуктов питания [3]. Длительное термическое воздействие при производстве отдельных продуктов питания вызывает заметные изменения, что снижает их качество. Тепловые процессы при производстве пищи зачастую приводят к образованию химических токсикантов, при этом их количество и качественный состав находятся в прямой зависимости от используемых кулинарных технологий. Традиционно и повсеместно используемые процессы производства пищи с использованием СВЧ-печей и фритюра могут приводить к образованию гетероциклических аминов, являющихся индукторами мутагенных изменений в организме человека [4]. При термической обработке мяса (жарка на гриле, варка) происходит потеря мясного сока, содержащего насыщенные липиды. Результатом потери мясного сока является увеличение уровня полиненасыщенных жирных кислот в готовых блюдах, что в значительной степени обуславливает склонность такой пищи к активному окислению липидов, приводящему к существенному снижению качества за счет возникновения неприятных вкусовых ощущений у потребителей (прогорклые привкусы) [5].

Рост потребительского спроса на свежие продукты с более длительным сроком хранения и хорошими сенсорными качествами привел к обширным исследованиям в области нетермической обработки

продуктов питания [6]. При нетермической обработке пища подвергается воздействию температуры окружающей среды в течение ограниченного периода времени, что не вызывает никаких изменений в составе питательных веществ, текстура остается нетронутой, а вкусовые ощущения не теряются. В последние несколько десятилетий было предложено достаточно большое количество нетермических методов обработки продуктов питания, в том числе: импульсное электрическое поле, холодная плазма, ультразвук, микроволны, сверхкритические технологии и т. д. Практически все эти способы обработки продуктов питания приводят к снижению микробной нагрузки в продуктах питания, увеличивают сроки хранения, гарантируют хорошие сенсорные и текстурные характеристики пищи [3].

Ультразвуковая технология представляет собой перспективный метод нетермической обработки, характеризующийся высокой энергетической эффективностью. Данный подход находит широкое применение для оптимизации ключевых технологических процессов в пищевой промышленности, включая синтез биологически активных соединений, экстракцию ценных компонентов и консервацию пищевых продуктов. Важнейшими параметрами обработки выступают рабочий цикл и продолжительность воздействия, грамотный подбор которых позволяет существенно улучшить качественные характеристики продуктов питания. Рациональное сочетание этих параметров открывает возможности для создания функциональных пищевых продуктов с повышенной питательной ценностью и гарантированной безопасностью [7]. Другие технологии, такие как обработка сверхвысоким давлением и облучение, также используются в секторе переработки пищевых продуктов для достижения безопасности пищевых продуктов с минимальной или нулевой потерей питательных, текстурных и органолептических свойств.

После первых применений ультразвука (УЗ) в пищевых технологиях для аналитических целей, т. е. оценки качества, ученые отметили, что УЗ можно использовать во время обработки пищевых продуктов. Использование УЗ в перерабатывающей промышленности неуклонно росло в течение последних нескольких лет, что привело к постоянным изменениям в пищевых материалах в жидких системах посредством кавитации. Ультразвуковые процессы активируют микроорганизмы и ферменты для сохранения или обеззараживания пищевых продуктов, особенно когда УЗ сочетается с теплом и методами высокого давления. Все большее число промышленных процессов используют УЗ для помощи в процессе смешивания материалов, образования пен и агломератов, осаждения пыли, повышения эффективности фильтрации, сушки продуктов и извлечения твердых материалов и биологически активных соединений из овощей и продуктов питания. Ультразвуковые технологии могут заменить

традиционные методы дезинфекции, а УЗ воздействие не изменяет органолептические свойства пищевых продуктов [8]. Доказан стерилизующий эффект УЗ при обработке воды без применения химических реагентов, при обработке консервов, соков и других продуктов. Ультразвук становится методом защиты окружающей среды, поскольку он не производит вторичных загрязнителей [9].

Существует четыре типа кавитации в зависимости от способа генерации: акустическая, оптическая, корпускулярная и гидродинамическая. В технологических процессах, например, в пищевой промышленности, только акустическая и гидродинамическая кавитация считаются эффективными, поскольку они вызывают химические или физические изменения в обрабатываемом материале [10].

Надо сказать, что на сегодняшний день ультразвуковое воздействие используется в пищевых технологиях – в молочной индустрии, при переработке мяса, стерилизации и др. [7]. Однако, сведения разрознены, что обусловило необходимость в систематизации и обобщении имеющейся информации по применению ультразвукового воздействия различной интенсивности и его влиянию на свойства пищевых продуктов и ингредиентов.

Методология. Цель настоящего исследования – проанализировать влияние ультразвукового воздействия различной интенсивности на свойства и безопасность пищевого сырья, пищевых продуктов и ингредиентов.

Задачи:

1. Проанализировать применение ультразвуковых колебаний различного диапазона частоты в пищевой промышленности.
2. Систематизировать актуальные научные данные по применению ультразвукового воздействия различной интенсивности по видам пищевых продуктов.
3. Проанализировать влияние ультразвуковой модификации на свойства и безопасность пищевого сырья, пищевых продуктов и ингредиентов

В качестве объекта исследования выступили научные публикации отечественных и зарубежных авторов, освещающие влияние ультразвуковой обработки на пищевое сырье с целью модификации его свойств для дальнейшего использования в производстве продуктов питания и функциональных ингредиентов. В рамках работы проведен систематический поиск статей за 2016-2025 гг. с использованием ключевых запросов: «ультразвуковая обработка», «интенсивность воздействия», «пищевые ингредиенты», «безопасность», «потребительские характеристики». Источниками данных послужили открытые научные платформы: *eLibrary*, *CyberLeninka*, *Google Scholar*. Методология исследования включала: библиометрический анализ, отбор релевантных публикаций, экстракцию данных, их интерпретацию и синтез.

Результаты. Используемые в технологиях пище-

вых систем ультразвуковые волны (УЗВ) по их интенсивности можно разделить на УЗВ низкой и высокой интенсивности. УЗВ низкой интенсивности или высокой частоты имеют частоту более 100 кГц и интенсивность менее 1 Вт/см². Они определяются как диагностические волны из-за их способности оценивать структуру и физико-химические свойства пищевого продукта как во время обработки, так и хранения [7]. Высокоинтенсивные и низкочастотные ультразвуковые волны имеют частотный диапазон от 20 до 100 кГц, а интенсивность от 10 до 1000 Вт/см².

Примеры применения УЗВ в пищевой промышленности обобщены на рисунке 1.

При обработке УЗВ пищевых продуктов имеют место следующие возникающие эффекты [12, 13]:

- тепловой эффект – обусловлен передачей УЗВ в обрабатываемый продукт посредством вибрации, при которой энергия непрерывно поглощается материалом и выделяется тепло;
- механический эффект – распространение ультразвуковой волны в толще обрабатываемого продукта обуславливает образование эмульсий, разжижение гелей и диспергирование (микронизацию) твердых частиц; сжатие и растягивание пищевого продукта

(это вызывает его непрерывную усадку или расширение);

– кавитационный эффект – наблюдается только в жидких пищевых продуктах или продуктах с высоким содержанием влаги, проявляется в образовании и разрушении пузырьков воздуха под воздействием положительного или отрицательного акустического давления;

– капиллярный эффект – увеличение скорости и глубины проникновения жидкости в капиллярные каналы сырья и продукции. Капиллярные эффекты ультразвука находят свое применение, например, в процессах сушки макаронных изделий (ускорение сушки) или при экстрагировании биологически активных веществ из сырья.

В отличие от низкоинтенсивных акустических волн, ультразвуковое воздействие провоцирует значительные трансформации в физико-химических, биохимических и структурно-механических характеристиках пищевых продуктов. Это способствует не только повышению их питательной ценности, но и оптимизации технологических параметров ингредиентов (табл. 1), а также улучшению органолептических показателей и продлению срока годности (табл. 2). [14].

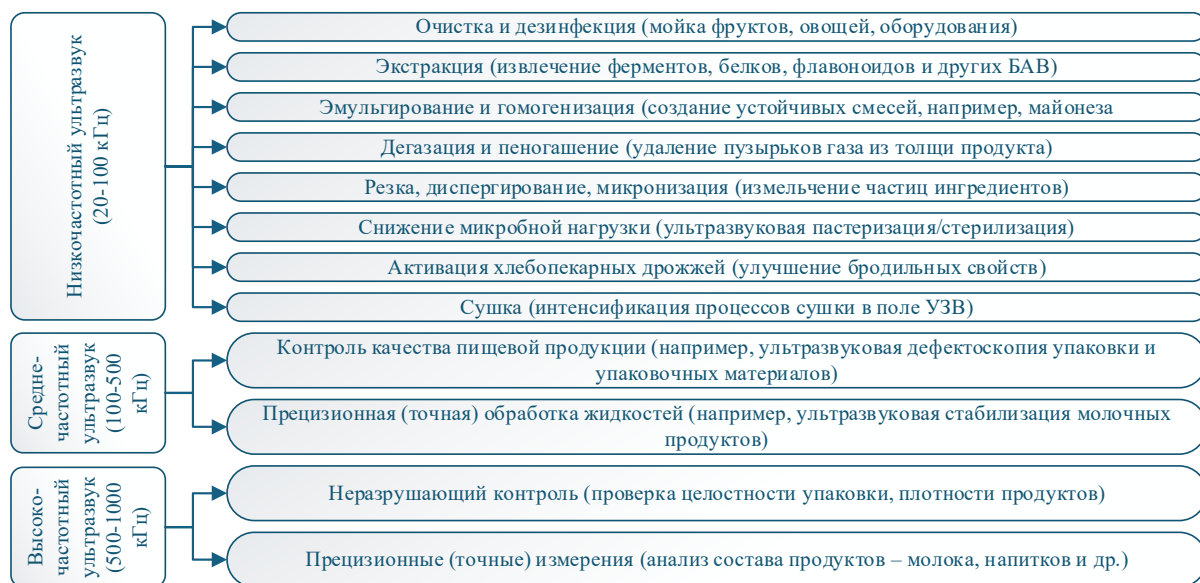


Рисунок 1 – Применение ультразвука в пищевой промышленности (составлено авторами по [8, 10, 11])

Таблица 1 – Применение ультразвука для модификации пищевых ингредиентов

Ингредиент (объект модификации)	Цель модификации	Условия УЗ модификации	Ссылка на исследование
Картофельный крахмал	Улучшение свойств картофельного крахмала как загустителя	Прибор «Волна» УЗТА–0,63/22-ОМ, частота 22±1,65 кГц, выходная мощность 630 Вт, температура не более 50 °С.	[15]
Очищенная флавоноидная фракция облепихового шрота (ОФФОШ)	Микронизация для увеличения консервирующих свойств ОФФОШ	Прибор «Волна» УЗТА–0,4/22-ОМ, частота 22±1,65 кГц, оптимальная мощность для микронизации 50 Вт, продолжительность 10 мин	[16]
Фукоидан	Микронизации фукоидана для применения в технологиях пищевых производств	Прибор «Волна» УЗТА–0,4/22-ОМ, частота 22±1,65 кГц, оптимальная мощность для микронизации 240 Вт, продолжительность 3 мин	[17]
Пектин из топинамбура	Повышение выхода пектина – стабилизатора из сырья топинамбура	Универсальная ультразвуковая установка Инлаб И100-840, выходная мощность 1000 Вт (с регулировкой от 0 до 100 %); диапазон рабочих частот 22 и 44 кГц.	[18]

Таблица 2 – Применение ультразвука для модификации сырья и пищевых систем

Сырье/пищевая система (объект модификации)	Цель модификации	Условия УЗ модификации	Ссылка на исследование
Продовольственное сырье, подверженное контаминации микотоксинами	Обеззараживание продовольственного сырья и подавление роста плесневых грибов-продуцентов микотоксинов	550-W power ultrasonic instrument (Branson Ultrasonic Co., Shanghai, China), частота 20 кГц	[19]
Саями	Активация роста бактерий стартовой культуры	Ультразвуковая ванна Elma® TI-H 5 25 кГц, температура 20 °С, продолжительность 3, 6 или 9 мин	[20]
Мясная модельная система	Подавление роста <i>L. sakei</i> в мясных системах	Ультразвуковой аппарат XL2020 (XL2020 Heat Systems, Misonix Inc., Farmingdale, NY, USA), частота 20 кГц, выходная мощность – 68,5 Вт, продолжительность – до 9 мин	[21]
Мясорастительные паштеты	Формирование структурно-механических свойств	Аппарат «Волна», УЗТА-0,4/22-ОМ, частота 22±1,65 кГц, оптимальная интенсивность ультразвукового воздействия 16 Вт/см ² , температура 70 °С, продолжительность 30 сек	[22]
Двойные эмульсии типа «масло-вода-масло»	Формирование реологических свойств двойных эмульсионных пищевых систем с высоким содержанием полиненасыщенных жирных кислот	Ультразвуковой гомогенизатор с выходной мощностью 0,75 кВт, частота 20 кГц	[1]
Зерно пшеницы, ячменя и овса	Повышение биодоступности компонентов растительного сырья за счет активации и регуляции процесса прорастания зерна	Прибор «Волна» УЗТА–0,63/22-ОМ, частота 22±1,65 кГц, интенсивность ультразвукового воздействия 20 Вт/см ²	[2]
Соя (бобы)	Снижение активности антипитательных веществ сои и повышение качества белка	Ультразвуковая установка УЗУ-1,6-О, частота 18-20 кГц	[23]

Обсуждение. В результате исследований А.А. Руськиной и соавт. [15] установлено, что ультразвуковая модификация крахмала позволяет получить пищевой ингредиент с новыми технологическими свойствами. Утверждается, что модифицированный ультразвуком крахмал имеет более низкую температуру клейстеризации (на 17°С ниже по сравнению с нативным крахмалом), увеличенный выход амилозы и более однородный размер частиц.

Достаточно эффективным направлением использования УЗ может являться микронизация пищевых ингредиентов. Так в работах [16] и [17] авторами обсуждается использование низкочастотного ультразвукового воздействия на очищенную флавоноидную фракцию облепихового шрота и фукоидан для получения наноразмерных частиц. Авторами доказано, что микронизированные объекты исследований более сильно проявляют характерные для них функциональные свойства.

Положительна роль УЗ в протекании процессов экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья. Исаков И.Ж. и соавт. [18] отмечают высокую эффективность использования ультразвукового излучения при экстрагировании топинамбура при низких температурах. Исследователи связывают большую эффективность процесса при низких температурах с тем, что провоцируемые высокой температурой диффузионные явления при извлечении отдельных компонентов уменьшают результативность кавитационного воздействия. Известно также получение с помощью ультразвука природных растительных пигментов – красителей (каротиноидов, антоцианов и беталаинов) из кожуры

и выжимок фруктов и овощей, а также хлорофилла из стеблей и листьев растений [24]. К ключевым достоинствам предлагаемого решения относятся увеличения выхода и качества пигментов, сокращение продолжительности, расхода растворителей, а также их широкий перечень (вода, пищевые масла, ионные жидкости и др.). В тоже время, указывается что длительное воздействие УЗ в сочетании с высокими температурами, мощностью или амплитудой приводят к деградации извлекаемых пигментов. В работе [25] приведены данные положительного влияния ультразвуковой экстракции при мощности обработки 100-150 Вт, частоте 25-45 кГц, температуре 37-58°С, в течение 15-25 мин флавоноидов и антоцианов из луковой шелухи.

Достаточно специфична роль ультразвука в инициации и интенсификации химических реакций. В работе [19] показаны механизмы инициации разрыва химических связей в молекулах микотоксинов и обезвреживания пищевого сырья, зараженного плесневыми грибами-продуцентами пищевых токсинов. Раскрытие подобного механизма обеспечивает широкий перечень возможного использования данной технологии, однако уровень детоксикации не высок, и не обеспечивает полного удаления микотоксинов из сырья. В исследовании [25] описано эффективное влияние ультразвука на процессы гликозилирования, протекающие между различными углеводами и растительными белками. Высоко оценивается роль УЗ в интенсификации протекания реакции Майяра. Отмечается, что в продуктах проявляются улучшенные сенсорные характеристики (улучшенные цвет и вкус, сниженная

горечь), более высокая антиоксидантная активность, а также ингибирование процессов образования нежелательных компонентов – акриламида и конечных продуктов гликирования.

Положительное влияние УЗ на формирование реологических характеристик растительных и мясных пищевых систем обусловлены во многом сложными механизмами трансформации белковых молекул: после обработки ультразвуком происходит частичное разворачивание белковых молекул и уменьшение числа гидрофобных групп на поверхности белка, что улучшает эмульгирующие свойства [22, 26].

Показательна роль УЗ на активацию роста микроорганизмов, используемых в пищевых процессах. В работе [20] на примере стартовой культуры для созревания салями (смесь штаммов *Lactobacillus* и *Staphylococcus* в соотношении 50:50) продемонстрировано влияние низкочастотного ультразвука на скорость роста бактерий при реализации низкотемпературной технологии обработки сформованных колбас в течение 9 мин. В работе [21] рассмотрены вопросы интенсификации роста *Lactobacillus sakei* при ферментации мясной пищевой системы, авторами доказано, что ультразвук интенсифицирует рост данного микроорганизма. В дальнейшем это положительно сказывается на сроках годности мясных продуктов, поскольку продукты жизнедеятельности *L. sakei* эффективно подавляют рост и развитие нежелательных *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* и *Salmonella typhimurium*.

Анализ вышеприведенных оригинальных исследований позволяет выделить основные преимущества использования ультразвука в пищевых технологиях:

- во-первых, использование ультразвука позволяет значительно сократить энергозатраты на реализацию традиционных технологических процессов производства пищи, полуфабрикатов и ингредиентов;

- во-вторых, как правило применяемые ультразвуковые установки достаточно просты конструктивно, легко масштабируемы, не требуют высоких эксплуатационных затрат, а их очистка возможна традиционными способами (например, с использованием систем безразборной мойки);

- в-третьих, ультразвуковые технологии относятся к зеленым технологиям, что делает возможным рационализацию многих технологий за счет исключения использования ряда химических веществ и энергоёмких технологических решений;

- в-четвертых, возможность инициации протекания требуемых в продукте/полуфабрикате химических реакций за счет схлapyвания пузырьков воздуха, приводящего к появлению свободных радикалов, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях;

- в-пятых, создаваемые при ультразвуковой обработке механические эффекты – ударные волны, зоны турбулентности, микропотоки и т.д. значительным образом интенсифицируют явления массо-

переноса в обрабатываемой среде, что приводит как к сокращению продолжительности процессов, так и увеличению выхода целевых продуктов.

Выводы. Применение ультразвуковых волн в пищевой промышленности считается перспективным методом, сочетающим энергоэффективность и экологическую безопасность. Ультразвуковые технологии в настоящее время эффективно применяются в процессах экстрагирования, эмульгирования, замораживания, приготовления пищи, гелеобразования, микробной и ферментативной активации и инактивации, валоризации пищевых отходов и т.д. Включение ультразвука в традиционные процессы позволяет целенаправленно регулировать физико-химические, техно-функциональные свойства пищи, увеличивать сроки годности. Снижение потребления электроэнергии, растворителей, реагентов, простота реализации процессов и обеспечение нулевых выбросов в атмосферу является ключевыми достоинствами ультразвуковых технологий. Тем не менее, влияние ультразвука на конкретные пищевые технологии должно изучаться отдельно с целью установления как оптимальных параметров и режимов осуществления процессов производства, так и с целью уточнения возникающих явлений, изучения их механизмов и взаимодействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Стремин А.А., Федоренко Б.Н. Использование ультразвука для ускорения экстракции в пищевой промышленности // Вестник науки. №5 (62). Том 3. – С. 725-730. 2023 г. ISSN 2712-8849 // Электронный ресурс: <https://www.vestnik-nauki.ru/article/8293> (дата обращения: 04.05.2025 г.).
2. Науменко Н.В., Фаткуллин Р.И., Калинин И.В., Попова Н.В., Радкевич А.В. Возможности получения сырьевых ингредиентов растительного происхождения повышенной биодоступности // Индустрия питания / Food Industry. – 2023. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-polucheniya-syrievykh-ingredientov-rastitelnogo-proishozhdeniya-povyshennoy-biodostupnosti> (дата обращения: 12.05.2025).
3. Jadhav H.B., Annapure U.S., Deshmukh R.R. Non-thermal technologies for food processing // Frontiers in Nutrition. – 2021. – Т. 8. – С. 657090.
4. Babaoglu A.S., Karakaya M., Öz F. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in beef and lamb kokorec: effects of different animal fats. Int J Food Prop. (2017) 20:1960-70. doi: 10.1080/10942912.2016.1225761.
5. Oz E. The impact of fat content and charcoal types on quality and the development of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic aromatic amines formation of barbecued fish. Int J Food Sci Technol. (2021) 56:954-64. doi: 10.1111/ijfs.14748.
6. Melios S., Stramarkou M., Grasso S. Innovations in food: A review on the consumer perception of non-thermal processing technologies // LWT-Food Science and Technology. – 2025. – Т. 223. – С. 117688.
7. Bhargava N, Mor RS, Kumar K, Sharanagat VS. Advances in application of ultrasound in food processing: a review. Ultrason Sonochem. (2021) 70:105293. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105293.
8. Gallo M., Ferrara L., Naviglio D. Application of Ultrasound in Food Science and Technology: A Perspective // Foods. 2018. Vol. 7. P. 164. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods7100164>.
9. Liu Y., Li M., Liu Y., Bian K. Structures of Reaction Products and Degradation Pathways of Aflatoxin B1 by Ultrasound Treatment // Toxins. 2019. Vol. 11, no. 9. P. 526. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11090526>.
10. Jambrak A.R. Physical Properties of Sonicated Products: A New Era for Novel Ingredients // Ultrasound: Advances for

Food Processing and Preservation / Ed. by D. Bermudez-Aguirre. Academic Press, 2017. – P. 237-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804581-7.00010-5>.

11. Феофилактова О.В. Влияние ультразвукового диспергирования на реологические свойства двойных эмульсионных пищевых систем с высоким содержанием полиненасыщенных жирных кислот // Индустрия питания / Food Industry. – 2022. – №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-ultrazvukovogo-dispergirovaniya-na-reologicheskie-svoystva-dvoynnyh-emulsionnyh-pischevyh-sistem-s-vysokim-soderzhaniiem> (дата обращения: 12.05.2025).

12. Л.Ч. Бурак, А.П. Завалей Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // Техника и технология пищевых производств. – 2024. – №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-kombinirovannogo-vozdeystviya-ultrazvuka-i-mikrovoln-pri-obrabotke-pischevyh-produktov-obzor> (дата обращения: 12.05.2025).

13. Li M., Zhou C., Wang B., Zeng S., Mu R., Li G. et al. Research progress and application of ultrasonic- and microwave-assisted food processing technology // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2023. – Vol. 22, no. 5. – P. 3707-3731. DOI: 10.1111/1541-4337.13198.

14. Kahraman O., Malvandi A., Vargas L., Feng H. Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method // Ultrasonics Sonochemistry. – 2021. – Vol. 73. – Art. 105510. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105510.

15. Руськина А.А., Калинина И.В., Попова Н.В. [и др.] Влияние ультразвуковой модификации картофельного крахмала на его функционально-структурные свойства и дисперсный состав // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82, № 3. – С. 176-182. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-3-176-182. EDN: QFVMDX.

16. Аверьянова Е.В., Школьников М.Н., Павлова Н.В., Рожнов Е.Д. Микронизация в технологии минорного компонента консервирующего действия // Техника и технология пищевых производств. – 2024. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikronizatsiya-v-tehnologii-minornogo-komponenta-konserviruyuschego-deystviya> (дата обращения: 12.05.2025).

17. Потороко И.Ю., Ускова Д.Г., Паймулина А.В., Удей Б. Использование ультразвуковой микронизации растительного ингредиента фукоидана для применения в технологиях пищевых производств // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2019. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-ultrazvukovoy-mikronizatsii-rastitelnogo-ingredienta-fukoidana-dlya-primeneniya-v-tehnologiyah-pischevyh-proizvodstv> (дата обращения: 12.05.2025).

18. Искаков И.Ж., Ланина Е.Е., Кучеренко В.Я., Алексеев Г.В., Егорова О.А. Анализ параметров экстрагирования пектина из топинамбура с использованием ультразвука // ТИПП АПК. – 2022. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-parametrov-ekstragirovaniya-pektina-iz-topinambura-s-ispolzovaniem-ultrazvuka> (дата обращения: 12.05.2025).

19. Liu, Y.; Li, M.; Liu, Y.; Bian, K. Structures of Reaction Products and Degradation Pathways of Aflatoxin B1 by Ultrasound Treatment. Toxins 2019, 11, 526. <https://doi.org/10.3390/toxins11090526>.

20. de Lima Alves L., Flôres S.H., de Oliveira Rios A., et al. Effect of ultrasound on the physicochemical and microbiological characteristics of Italian salami // Food Research International. – 2018. – Vol. 106. – P. 363-373. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.01.011.

21. Ojha K.S., Mason T.J., O'Donnell C.P., Kerry J.P., Tiwari B.K. Effect of high intensity ultrasound on the fermentation profile of Lactobacillus sakei in a meat model system // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 31. – P. 539-545. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.02.004.

22. Агальцева Н.С., Егорова Е.Ю., Кузьмина С.С., Цыганок С.Н. Использование ультразвука для диспергирования и стабилизации водно-дисперсной структуры мясорастительных паштетов с повышенной утилитарностью белков // Ползуновский вестник. – 2022. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-ultrazvuka-dlya-dispergirovaniya-i-stabilizatsii-vodno-dispersnoy-struktury-myasorastitelnyh-pashtetov-s-povyshennoy-utilitarnostyu-belkov>

nyh-pashtetov-s-povyshennoy (дата обращения: 12.05.2025).

23. Рудик Ф.Я., Загородских Б.П., Моргунова Н.Л., Кодацкий Ю.А. Совершенствование технологии переработки сои с использованием ультразвука // Вестник МГУ. – 2018. – №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-tehnologii-pererabotki-soi-s-ispolzovaniem-ultrazvuka> (дата обращения: 12.05.2025).

24. Linares G., Rojas M.L. Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Pigments From Food Processing By-Products: A Review // Frontiers in Nutrition. 2022. Vol. 9. Art. 891462. DOI: 10.3389/fnut.2022.891462.

25. Погорелов А.Г., Ипатова Л.Г., Погорелова В.Н., Панаит А.И., Станкевич А.А., Суворов О.А. Ультразвуковая экстракция пигментов из растительного сырья. Обзор // Химия растительного сырья. – 2025. – №1. – С. 31-56. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250114798>.

26. Taha A., Mehany T., Pandiselvam R., Siddiqui S.A., Mir N.A., Malik M.A. [et al.] Sonoprocessing: mechanisms and recent applications of power ultrasound in food // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2023. – Vol. 64, no. 17. – P. 6016-6054. DOI: 10.1080/10408398.2022.2161464.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 641.1

EDN: TFHWPH

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУКИ ИЗ ПРОРОЩЕННОГО ЗЕРНА ОВСА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЧЕНЬЯ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8707-6667

AuthorID: 612403

ORCID: 0000-0002-4807-1612

ResearcherID: AAK-5551-2020

ScopusID: 57208470264

БЫЧЕНКОВА Валерия Владимировна, кандидат технических наук,
доцент Высшей школы биотехнологии и пищевых производств

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: bychenkova_vv@spbstu.ru)

SPIN: 1522-7257

AuthorID: 52953

ORCID: 0009-0002-3799-7142

ScopusID: 57212351940

БАЖЕНОВА Ирина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы биотехнологии и пищевых производств

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: irinabazhenova@mail.ru)

SPIN: 7048-5806

AuthorID: 199187

ORCID: 0000-0001-8322-9027

ResearcherID: L-5178-2018

ScopusID: 57212343119

ЧЕРНОВА Елена Викторовна, доктор экономических наук, профессор,
профессор кафедры гостиничного и ресторанного бизнеса

Санкт-Петербургский государственный экономический университет

(191023, Россия, Санкт-Петербург, наб. канала Грибоедова, д. 30-32, литер А, e-mail: chernova68@list.ru)

AuthorID: 354229

ORCID: 0009-0009-4111-0154

КОТОВА Наталья Петровна, кандидат технических наук, доцент, преподаватель спецдисциплин
«Колледж кулинарного мастерства»

(195273, Россия, Санкт-Петербург, ул. Руставели, д. 35, литер А, e-mail: kotovanp2@gmail.com)

Аннотация. В статье представлены рецептуры овсяного печенья с использованием муки из пророщенного зерна. Овес и продукты его переработки являются источниками таких макро- и микронутриентов, как железо, кремний, цинк, марганец, иод, калий, натрий, магний, фосфор, витамины А, Е, Н, группы В, холин. При проращивании зерна синтезируются и активируются гидролитические ферменты. Так, действие эндопептидаз приводит к гидролизу запасных белков и высвобождению олигопептидов и аминокислот, также увеличивается количество альбуминов, имеющих наиболее сбалансированный аминокислотный состав. Это приводит к лучшему усвоению белковых веществ в желудочно-кишечном тракте. Действие амилаз, гидролизующих крахмал, приводит к уменьшению количества углеводов. При проращивании в зерне происходит увеличение количества активности фитазы, ведущей распад фитатов, что способствует переходу железа, цинка, магния и фосфора в более биодоступную форму. Изменяется и витаминный состав: возрастает количество витаминов Е, РР, В₁, В₂, В₆. Поэтому использование пророщенного зерна и муки из него позволяет повысить биологическую ценность готовых изделий. В разработанных рецептурах произведена замена овсяной муки на муку из пророщенного зерна на 50 и 100%. Расчеты показали, что при такой замене содержание ряда минеральных веществ и витаминов увеличивается. По содержанию витамина В₁ и магния они даже могут считаться функциональными продуктами, т.к. удовлетворяют суточную потребность в этих компонентах более чем на 15%. Показатели влажности и щелочности соответствовали требованиям ГОСТ 5900-2014 и 5898-2022 соответственно. Влажность варьировалась от 9,03±0,39 до 9,32±0,76%; щелочность – от 0,73±0,14 до 0,80±0,25 градусов. По активности воды (от 0,22 до 0,27) печенье относится к продуктам с низкой влажностью, что определяет их достаточно продолжительные сроки хранения (до 45 суток). Разработанные изделия позволяют расширить ассортимент мучных кондитерских изделий, рекомендуются для широкого круга потребителей, в том числе для последователей здорового питания.

Ключевые слова: овес, мука, пророщенное зерно, печенье, расширение ассортимента, биологическая ценность, пищевая ценность, рецептура, здоровое питание, функциональные продукты, суточная потребность.

USING FLOUR FROM GERMINATED OAT GRAIN FOR COOKIE PRODUCTION

© The Author(s) 2025

BYCHENKOVA Valeria Vladimirovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Higher School of Biotechnology and Food Production

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya Street, Building 29, 29, e-mail: bychenkova_vv@spbstu.ru)

BAZHENOVA Irina Anatolyevna, candidate of technical sciences, docent,
associate professor of the Higher School of Biotechnology and Food Production

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya Street, Building 29, e-mail: irinabazhenova@mail.ru)

CHERNOVA Elena Victorovna, doctor of Economics, professor,
professor of the Department of Hotel and Restaurant Business

Saint-Petersburg State University of Economics

(191023, Russia, St. Petersburg, nab. Griboyedov Canal, 30-32, letter A, e-mail: chernova68@list.ru)

KOTOVA Natalia Petrovna, candidate of technical sciences, docent, teacher of special disciplines

College of Culinary Excellence, St. Petersburg

(195273, Russia, Saint Petersburg, Rustavli str., 35, letter A, e-mail: kotovanp2@gmail.com)

Abstract. The article presents recipes for oatmeal cookies using sprouted grain flour. Oats and its processed products are sources of such macro- and micronutrients as iron, silicon, zinc, manganese, iodine, potassium, sodium, magnesium, phosphorus, vitamins *A, E, H*, group *B*, choline. During grain germination, hydrolytic enzymes are synthesized and activated. thus, the action of endopeptidases leads to the hydrolysis of reserve proteins and the release of oligopeptides and amino acids, and the number of albumins with the most balanced amino acid composition increases. This leads to better absorption of protein substances in the gastrointestinal tract. The action of starch hydrolyzing amylases leads to a decrease in the amount of carbohydrates. during germination in the grain, there is an increase in the amount of phytase activity leading to the breakdown of phytates, which promotes the transition of iron, zinc, magnesium and phosphorus into a more bioavailable form. The vitamin composition is also changing: the amount of vitamins *E, PP, B₁, B₂, B₆* is increasing. Therefore, the use of sprouted grain and flour from it can increase the biological value of finished products. In the developed formulations, oat flour was replaced with sprouted grain flour by 50 and 100%. Calculations have shown that with such a replacement, the content of a number of minerals and vitamins increases. For example, in terms of vitamin *B₁* and magnesium content, they can even be considered functional products, since they satisfy the daily requirement for these components by more than 15%. The humidity and alkalinity values met the requirements of GOST 5900-2014 and 5898-2022, respectively. Humidity ranged from 9,03±0,39 to 9,32±0,76%; alkalinity ranged from 0,73±0,14 to 0,80±0,25 degrees. According to the water activity (from 0,22 to 0,27), cookies belong to products with low humidity, which determines their rather long shelf life (up to 45 days). The developed products make it possible to expand the range of flour confectionery products, and are recommended for a wide range of consumers, including followers of a healthy diet.

Keywords: oats, flour, sprouted grain, cookies, assortment expansion, biological value, nutritional value, recipe, healthy eating, functional products, daily requirement.

Для цитирования: Быченкова В.В. Использование муки из пророщенного зерна овса для производства печенья / В.В. Быченкова, И.А. Баженова, Е.В. Чернова, Н.П. Котова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 162-168. – EDN: TFHWPH.

Введение. Зерновые продукты имеют большое значение для продовольственной безопасности России в условиях импортонезависимости. Для обогащения разных видов пищевой продукции и расширения ассортиментной линейки в настоящее время применяют как традиционные, так и модифицированные виды сырья.

Овес используется во многих национальных кухнях, в том числе русской. Упоминание о нем есть в «Повести временных лет» за 997 год от рождества Христова (6505 год от сотворения мира) [1]. Зерно и муку из овса использовали для приготовления каш, кулешей (с мясом, рыбой, овощами), киселей, хлеба, блинов, пудингов. Зерно содержит 7-19% белка, 50-60% углеводов, в т.ч. 10% клетчатки, 6-9%

жиров. Употребление 100 г овса покрывает суточную потребность в витамине *B₁*, железе, цинке, магнии, фосфоре более, чем на 30%; *B₃, B₄, B₅* на 20%; селене более чем на 40%; меди – на 60%; марганце – на 260%.

В последнее время многие исследователи в своих работах начали использовать пророщенное зерно для производства мясо-крупяных и овоще-крупяных консервов, сыров, смузи и продукции общественного питания; а в производстве хлебобулочных и мучных кондитерских изделий – муку из пророщенного зерна различных культур. Отмечается, что пророщенный овес – это не только источник белка, но и β-глюкана (2,1%), тиамина (687,1 мкг / 100 г), рибофлавина (218,4 мкг / 100 г) и минералов (*P, K, Mg* и *Ca*). Отличается высоким уровнем таких незаменимых

аминокислот, как метионин, цистин, фенилаланин, а также γ -аминомасляной кислоты (54,9 мг / 100 г); обладает большим антиоксидантным потенциалом (1744,3 мг ТЕ 100 г), чем не пророщенный овес [2].

Пророщенный овес, как самостоятельно, так и в смеси с другими крупами используется для создания продукции с повышенной пищевой и/или биологической ценностью [3-5]. Добавление муки из пророщенного зерна овса влияет на реологические и хлебопекарные свойства теста [6], при этом исследователи отмечают, что «не всегда хлебопекарная оценка подтверждается реологическими показателями теста, ..., не во всех случаях прослеживается четкая зависимость между полученными параметрами» [7].

При прорастании зерна активируются ферменты, идет частичный гидролиз биополимеров (полисахаридов, белков, липидов), запускаются процессы синтеза новых соединений, необходимых для роста организма. В результате синтезируются витамины C , B_1 , B_5 , B_6 , B_9 , E , возрастает содержание кальция, натрия, меди, железа, цинка, кремния, природных антибиотиков, уменьшается содержание фитатов. Это позволяет обогатить продукты биологически активными веществами, в т.ч. антиоксидантами, и повысить биодоступность нутриентов [8]. Шаскольские Н.Д. и В.В. в сухих семенах овса голозерного и в проростках определяли суммарное содержание водорастворимых антиоксидантов. Было показано, что содержание веществ с антиоксидантной активностью увеличивается на протяжении периода прорастивания. Так, в сухих семенах их количество составляло 34 мг/100 г сухого вещества, в двухдневных проростках – 65, в пятидневных – 334, т.е. в 1,9 и 9,8 раз больше исходного [9].

Арисов А.В. с соавторами в работе с цельнозерновой мукой из смеси четырех видов пророщенных зерен (в том числе и овса) выявили, что при прорастивании за счет гидролитического распада уменьшается количество крахмала (на 6,6%), увеличивается содержание моно- и дисахаридов (на 134,4%). Также было отмечено увеличение количества пищевых волокон (на 14,8%). Разработанная авторами смесь рекомендована для обогащения рецептурного состава различных блюд, производимых на предприятиях общественного питания [10].

Изучение Бутенко Л.И. аминокислотного, полисахаридного и минерального состава пророщенных семян овса, гречихи и ячменя выявило их высокую биологическую активность [11]; высокая пищевая ценность представлена в работе Зеньковой М.Л. и Акулич А.В. [8].

Ходунова О.С. и Силантьева Л.А. в пророщенном овсе определяли изменение содержания минеральных веществ и витаминов. Они выявили, что при прорастивании содержание кремния увеличивается в 1,5 раза, кальция, натрия, меди, железа, цинка – в 2 раза, витамина B_2 – в 5,5 раз, повышается содержание природных антибиотиков и стимуляторов роста

(ауксинов и гиббереллинов) [12].

Баженовой Т.С. изучена протеиназная, амилазная и липазная активность, изменение содержания белков, аминокислот, фенольных соединений и редуцирующих сахаров, идущие при прорастивании зерна. На примере проса показано, что при прорастании увеличивается содержание большинства незаменимых аминокислот в 1,2-2,8 раза, фенольных соединений и редуцирующих сахаров в 1,5 раза [13]. Подобные данные (увеличение в пророщенных зернах количества белка, аминокислот, витаминов группы B , имеющих большое значение для улучшения когнитивных способностей человека, уменьшение жиров и углеводов) представлены также в статьях Кыдыралиева Н.А. и Шаршембиевой А.М. [14] (для овса), Р.Ф. Мияхира (Miyahira R.F.) с соавторами [15] (для пшеницы). Гематдинова В.М. и др. показали, что снижение содержания крахмала сопровождается увеличением количества β -глюкана до 16% [16].

Кроме изменения количества макро- и микронутриентов процесс прорастивания зерна влияет на повышение их усвояемости. «Процесс прорастания активирует ферменты, увеличивается активность (протеолитическая, амилалитическая, липолиз), ведущая к разложению сложных соединений, улучшая их усвояемость и перевариваемость» [17].

Пищевые продукты с пророщенным овсяным зерном пользуются высоким спросом у сторонников здорового питания [18], используются в меню школьных столовых [19].

При этом наиболее востребованы мучные кондитерские изделия, что определило выбор объектов исследования.

Методология. Объектами исследования являлись образцы овсяного печенья, приготовленные по классической рецептуре, а также с частичной и полной заменой овсяной муки на муку из пророщенного зерна. Контрольным образцом было овсяное печенье с соотношением овсяной муки к пшеничной муке высшего сорта как 2:1. Для приготовления опытных образцов печенья проростки голозерного овса высушивали в пароконвектомате в течение 40-50 мин. при температуре 60°C, мощности кондиционирования воздуха до 0,3 кВт. Влажность проростков овса составляла не более 8%. Высушенные проростки измельчали до размера 50-80 микрон.

В контрольном образце овсяного печенья соотношение «мука пшеничная – мука овсяная» составляло один к двум (или 16,8:33,6% к общей массе рецептуры). В экспериментальных рецептурах производилась замена овсяной муки на муку из проростков: в образце 1 – на 50, в образце 2 – на 100%. Таким образом, в образце печенья 1 соотношение «мука пшеничная – мука овсяная – мука из пророщенного овса» составляло 1:1:1 (в процентах к общей массе рецептуры, как 16,8:16,8:16,8). В образце печенья 2 соотношение «мука пшеничная – мука из пророщенного овса» составляло 1:2 (или 16,8:33,6% к общей массе рецептуры). Другие ис-

пользуемые ингредиенты: сахарный песок – 19,8%; меланж – 13,8%; изюм – 5,9%; масло сливочное – 8,9%; разрыхлитель – 0,7%; ванилин и корица – по 0,07%, соль – 0,4%. Все продовольственное сырье и пищевые продукты соответствовали требованиям национальных стандартов на данный вид продукции (ГОСТ), проростки овса измельченные – требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Для контрольного и опытных образцов печенья проводили органолептическую оценку по ГОСТ 24901-2014 [20]. Группа дегустаторов в составе десяти человек оценивали вкус и запах, форму, поверхность, цвет, вид на разрезе (изломе). В соответствии с требованиями стандарта для каждого показателя была разработана шкала оценки от одного до пяти баллов, руководствуясь которой дегустаторы оценивали качество контрольного и экспериментальных образцов печенья.

Влажность определяли по ГОСТ 5900-2014 [21]. Навески печенья сушили при температуре 130°C в течение 30 мин.

Определение витаминов B_1 и B_2 производили по методике М 04-56-2009 с использованием анализатора жидкостей «Флюорат-02» [22]. Данная методика включена в перечень стандартов технического регламента ТР ТС 021/2011. Метод основан на измерении интенсивности флюоресценции. При взаимодействии витамина B_1 с железосинеродистым калием в щелочной среде образуется тихром. При определении витамина B_2 проводят тушение его люминесценции тиомочевинной.

Щелочность печенья определяли по ГОСТ 5898-2022 титриметрическим методом с применением 0,1М соляной кислоты и индикатором бромтимолового синего [23]. Определение показателя щелочности является обязательным для мучных кондитерских изделий, при производстве которых применяются

химические разрыхлители.

Пищевая и энергетическая ценность, содержание минеральных веществ и витаминов определяли расчетным путем с использованием таблиц химического состава [24].

Активность воды определяли на анализаторе *Pawkit*.

Результаты. Результаты органолептической оценки показали, что разработанные образцы печенья с пророщенным овсяным зерном незначительно отличаются от контрольного.

На рисунке 1 представлены органолептические профили контрольного и экспериментальных образцов.

Расчет пищевой ценности показал, что при замене овсяной муки на муку из пророщенного овса незначительно увеличивается содержание белка, а содержание жиров и углеводов практически не изменяется. Так, количество белка в 100 г контрольного образца печенья – 7,56 г; в образцах 1 и 2 – 8,01 и 8,45 г соответственно.

Изменение содержания минеральных веществ представлено на рисунке 2.

Содержание витаминов B_1 и B_2 проведено расчетным и экспериментальным методами, результаты которых совпали.

Определение витаминов E и PP проведено расчетным путем. Результаты представлены на рисунке 3.

Показатели влажности и щелочности нормируются действующими национальными стандартами. Определение показало, что оба показателя для всех образцов не превышают значения, рекомендованные ГОСТ. Влажность колеблется от $9,03 \pm 0,39$ до $9,32 \pm 0,76$ процентов; щелочность – от $0,73 \pm 0,14$ до $0,80 \pm 0,25$ градусов.

Активность воды в контроле и экспериментальных образцах составляла от 0,22 до 0,27.

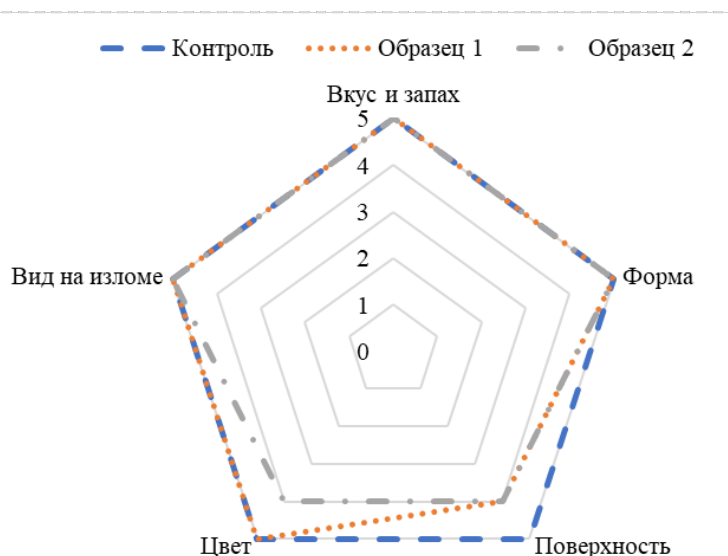


Рисунок 1 – Органолептические профили контрольного и экспериментального образцов печенья

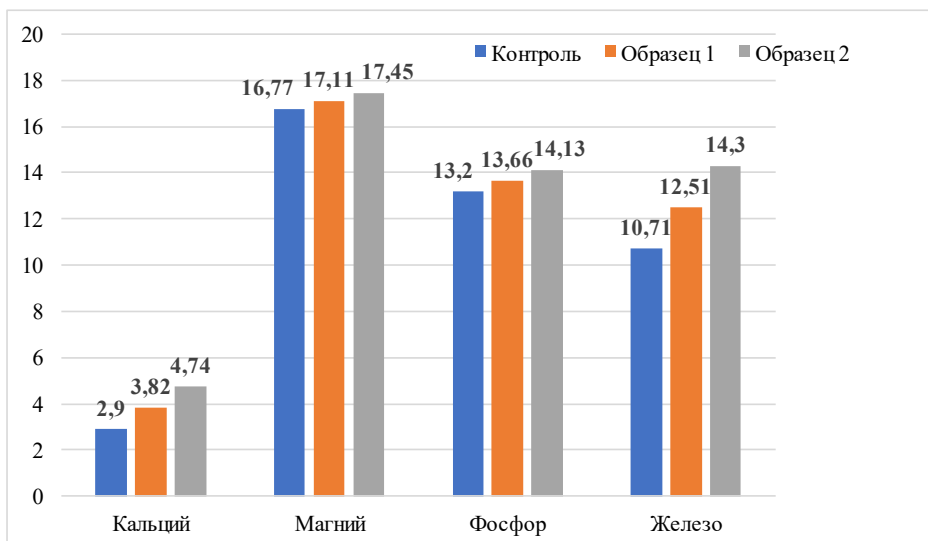


Рисунок 2 – Количество минеральных веществ в контрольном и экспериментальном образцах, в процентах от суточной нормы

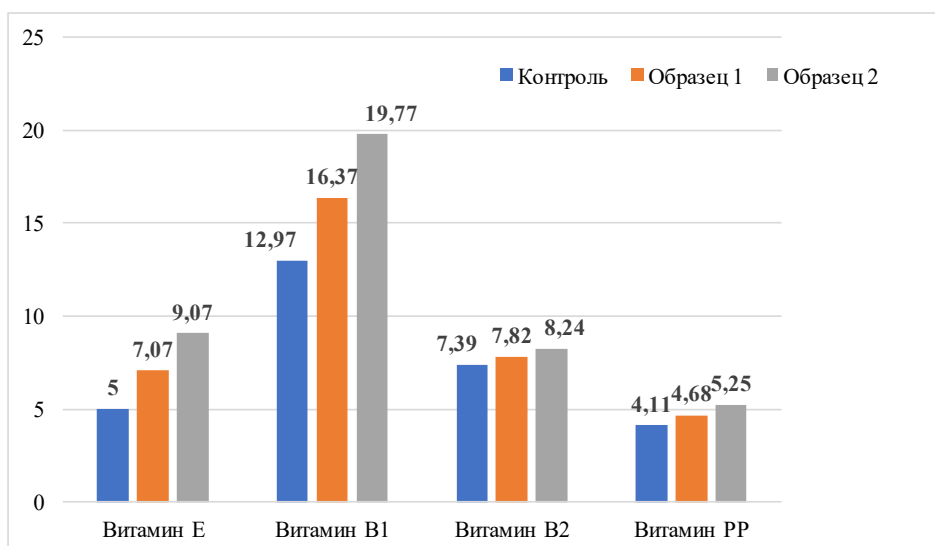


Рисунок 3 – Количество витаминов в контрольном и экспериментальном образцах, в процентах от суточной нормы

Обсуждение. При выборе продукции современные потребители обращают внимание как на пользу, которой обладает продукт, так и на его органолептические показатели. Важно, чтобы новые продукты имели привычный вид, вкус, цвет, запах, близкий к традиционной продукции. При проведении органолептического анализа определено, что внесение муки из пророщенного зерна овса не оказывает существенного влияния на основные показатели, наблюдается лишь незначительное изменение цвета и увеличение шероховатости поверхности. Дегустаторы отмечали приятный вкус и аромат, некрошливую текстуру. Разработанные образцы позволяют расширить ассортимент овсяного печенья.

Расчет пищевой и энергетической ценности показал, что разработанные изделия можно отнести

к высококалорийной продукции. Если исходить из среднего значения суточной калорийности рациона в 2 000 ккал, то 100 г печенья, приготовленного как по основной, так и экспериментальным рецептурам, покрывают потребности в энергии на 17,0%, в белке – на 10-13%, в углеводах – на 13-15%, в жирах – на 10-12%.

Из рисунка 2 видно, что изменение содержания минеральных веществ происходит неодинаково. Так, количество магния и фосфора практически остается на одном уровне, тогда как содержание кальция и железа увеличивается. Содержание железа в печенье с частичной заменой овсяной муки на муку из пророщенного зерна увеличивается в 1,17 раза, с полной заменой – в 1,34 раза. Содержание кальция увеличивается в большей степени: в 1,3 и 1,6 раз в первом и втором образцах. Даже такое

увеличение количества кальция и железа является хорошим показателем, т.к. в рационе современного человека отмечается нехватка данных минеральных веществ, ведущая к остеопорозу и железодефицитной анемии. Кальций отвечает за состояние костей и зубов, участвует в механизмах свертываемости крови, работе ферментных систем. Железо участвует в энергетическом обмене (в синтезе АТФ), входит в состав гемоглобина крови и миоглобина мышц, улучшает когнитивную деятельность, участвует в окислительно-восстановительных процессах.

Несмотря на то, что количество магния в экспериментальных образцах не увеличилось по сравнению с контрольным, эту продукцию можно отнести к функциональной в соответствии с ГОСТ Р 55577, т.к. употребление 100 г печенья покрывает суточную потребность в магнии более чем на 15% [25]. Магний способствует передаче нервных импульсов, участвует в метаболизме углеводов и липидов, синтезе белка, работе мышц, является активатором ферментов.

Экспериментальные и расчетные методы определения содержания витаминов в печенье показали, что применение муки из пророщенного зерна овса ведет к увеличению их количества. Если содержание витаминов B_2 и PP увеличивается незначительно (от 1,1 до 1,3 раза), то количество витаминов B_1 увеличивается в 1,3 раза для образца 1 и в 1,5 раза – для образца 2. В контрольном образце количество витамина B_1 составило $0,237 \pm 0,057$ мг/100 г продукта; в образце 1 – $0,388 \pm 0,093$, в образце 2 – $0,462 \pm 0,111$. По содержанию витамина B_1 разработанные образцы печенья с частичной и полной заменой овсяной муки на муку из пророщенного зерна являются функциональными продуктами. Витамин B_1 способствует нормальной работе нервной, сердечно-сосудистой и пищеварительной систем, участвует в метаболизме углеводов и жиров, синтезе некоторых аминокислот, нормализует когнитивные способности человека.

Увеличение содержания витамина E более значительное: в 1,4 и 1,8 раз соответственно. Витамин E является сильным антиоксидантом, который противостоит окислительному стрессу, участвует в стабилизации клеточных мембран, нормализует работу половых желез.

Определение активности воды было связано с тем, что от данного показателя зависят сроки хранения готовых продуктов. Активность воды определяет протекание биохимических, микробиологических процессов. По этому показателю разработанные продукты относятся к продуктам с низкой влажностью. При такой активности воды в разработанных изделиях могут идти окисление жиров, ферментативные процессы, потеря водорастворимых веществ, развиваться дрожжи и плесени. Срок хранения изделий в вакуумной упаковке составляет 45 дней при температуре от 20 до 25°C и относительной влажности воздуха, не более 75%.

Выводы. Мука из пророщенного зерна является источником легко усваиваемых нутриентов, биологически активных веществ. Исследователями доказано, что при прорастании зерна синтезируются витамины, ферменты, изменяется количественный и качественный состав белковых соединений, углеводов и липидов. Использование пророщенного зерна и муки из него позволяет расширить линейку продукции пищевой промышленности и общественного питания, удовлетворить спрос разных групп населения на продукты здорового питания, в том числе специализированного и функционального.

В работе произведена замена овсяной муки в рецептуре печенья на муку из пророщенного овса (на 50 и 100%). Экспериментальные и расчетные методы исследования показали, что разработанные продукты имеют высокую пищевую и биологическую ценность. По содержанию витамина B_1 и магния они могут считаться функциональными продуктами, т.к. удовлетворяют суточную потребность в этих компонентах более чем на 15%. Разработанные изделия имеют достаточно длительные сроки хранения и рекомендуются для широкого круга потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Полное собрание русских летописей. Т.1, вып. 1: Повесть временных лет. Изд. второе. – Ленинград: Изд-во Академии Наук СССР, 1926-1928. – 379 с.
2. Aparicio-García N., Martínez-Villauenga C., Frias J., Peñas E. Sprouted oat as a potential gluten-free ingredient with enhanced nutritional and bioactive properties // Food Chem. 2021. Feb 15:338:127972. – 8 p.
3. Снитко О.С., Минина Е.М. Применение пророщенного зерна овса при производстве хлебобулочных изделий // Современные технологии сельскохозяйственного производства: сборник научных статей по материалам XXIV Международной научно-практической конференции (Гродно, 23 марта, 14 мая 2021 года): к 70-летию образования университета: агрономия, защита растений, технология хранения и переработки сельскохозяйственной продукции / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, УО «Гродненский государственный аграрный университет». – Гродно: ГГАУ, 2021. – С. 392-394.
4. Сергеева С.С. Функционально-технологические свойства зерна голозерного овса отечественной селекции и технология мучных кондитерских изделий на его основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.07. – Санкт-Петербург, 2019. – 16 с.
5. Руденко О.С., Баженова А.Е., Пестерев М.А., Святославова И.М. Оценка показателей качества печенья, изготовленного с добавлением инновационного полуфабриката, полученного из пророщенного зерна пшеницы // Научные труды КубГТУ. – 2019. – № 9. – С. 183-195.
6. Sergiacomo A., Bresciani A., Gallio F., Varetto P. and others. Sprouted oats (*Avena sativa* L.) in baked goods: from the rheological properties of dough to the physical properties of biscuits // Food and Bioprocess Technology. – 2024. – № 17. – P. 4094-4105.
7. Шаболкина Е.Н., Анисимкина Н.В. Результаты исследований реологических и хлебопекарных показателей теста из цельнозернового биоактивированного зерна овса голозерного в смеси с пшеничной мукой // Зерновое хозяйство России. – 2022. – Т. 14, № 4. – С. 28-33.
8. Зенькова М.Л., Акулич А.В. Влияние процесса проращивания зерен злаковых культур на их пищевую ценность // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 3. – С. 26-53.
9. Шаскольская Н.Д., Шаскольский В.В. Самая полезная еда: Проростки. – Санкт-Петербург: Веды, Азбука-Аттикус, 2011. – 192 с.

10. Арисов А.В., Тиунов А.В., Вяткин В.М. Разработка полуфабриката из цельнозерновой муки из пророщенного зерна // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 59-66.
11. Бутенко Л.И. Исследования химического состава пророщенных семян гречихи, овса, ячменя и пшеницы // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4-5. – С. 1128-1133.
12. Ходунова О.С., Силантьева Л.А. Разработка состава и технологии мягкого сыра с пророщенными зернами овса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2016. – № 1. – С. 100-106.
13. Баженова Т.С. Функционально-технологические свойства зерна проса посевного *Panicum miliaceum* L. отечественной селекции и разработка рецептур мучных изделий на его основе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.18.07. – Санкт-Петербург, 2019. – 20 с.
14. Кыдыралиев Н.А., Шаршембиева А.М. Перспективы использования проростков зернобобовых в питании школьников // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2019. – № 12. – С. 108-113.
15. Miyahira R.F., Lopes J.O., Antunes A.E.C. The use of sprouts to improve the nutritional value of food products: a brief review // Plant Foods Hum Nutr. – 2021. – V. 76 (2). – P. 143-152.
16. Гематдинова В.М., Канарский А.В., Канарская З.А., Кручина-Богданов И.В. Получение концентрата β-глюкана проращиванием овса // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 231-237.
17. Шаболкина Е.Н., Шевченко С.Н., Анисимкина Н.В. Влияние биоактивации на биохимический состав и амилотическую активность зерна овса голозерного // Зерновое хозяйство России. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 31-36.
18. Мячикова Н.И., Сорокопудов В.Н., Биньковская О.В., Думачева Е.В. Пророщенные семена как источник пищевых и биологически активных веществ для организма человека // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – 7 с.
19. Арисов А.В. Разработка блюд и рациона питания детей школьного возраста с использованием продуктов из пророщенного зерна: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2021. – 24 с.
20. ГОСТ 24901-2014 Печенье. Общие технические условия. – Москва: Стандартинформ, 2019. III, 7 [1] с.
21. ГОСТ 5900-2014 Изделия кондитерские. Методы определения влаги и сухих веществ. – Москва: Стандартинформ, 2019. II, 9 [5] с.
22. Методика М 04-56-2009. Определение витамина В1 и витамина В2 в пищевых продуктах, продовольственном сырье и БАД [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lumex.ru/metodics/22ARU01.05.32-1_vitamin-B_food.pdf/ (дата обращения 18.01.2025).
23. ГОСТ 5898-2022 Изделия кондитерские. Методы определения кислотности и щелочности. – Москва: Стандартинформ, 2022. IV, 11 [2] с.
24. Химический состав российских пищевых продуктов / Под ред. В.А. Тутельяна, Н.К. Долгушкина, Д.Б. Никитюка. – Москва: ТД ДеЛи, 2024. – 193 с.
25. ГОСТ Р 55577-2013 Продукты пищевые специализированные и функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности. – Москва: Стандартинформ, 2014. III, 16 [4] с.

Статья поступила в редакцию 15.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 642.58(005.932.5:331.31)

EDN: BMDEES

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРУДОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ПЕРСОНАЛА ШКОЛЬНЫХ СТОЛОВЫХ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 1741-9576

AuthorID: 353426

ORCID: 0000-0001-8917-7299

ResearcherID: AAZ-3976-2021

ScopusID: 57216442162

КОСТИНА Наталья Геннадьевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии и организации общественного питания
Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, 6, e-mail: oliegh.kostin@inbox.ru)

SPIN: 7743-5130

AuthorID: 361443

ORCID: 0000-0002-2170-1821

ResearcherID: G-6229-2018

ScopusID: 57214139422

КУРАКИН Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии и организации общественного питания
Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, 6, e-mail: kurakin1979@mail.ru)

SPIN: 5352-7112

AuthorID: 710027

ORCID: 0000-0001-5978-2850

ResearcherID: AAZ-5746-2021

ScopusID: 57220038026

ГРИГОРЬЕВА Роза Завдятовна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии и организации общественного питания
Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, Кемерово, улица Красная, 6, e-mail: roza-grigoreva@yandex.ru)

Аннотация. Исследование трудовых процессов и затрат рабочего времени позволяет решить большинство задач, связанных с рациональным использованием ресурсов и организацией эффективного производства. Цель исследования изучить детальную структуру хронометража затрат рабочего времени для основных штатных единиц школьных столовых г. Кемерово и разработать корректирующие мероприятия по повышению производительности труда персонала. Пищевые блоки школьных столовых образовательных учреждений были выбраны с учетом количества обучающихся в них школьников. Фактическое наблюдение затрат рабочего времени проводили стандартизированным методом фиксирования хронометража разных видов деятельности непосредственно на рабочих местах в школьных столовых. На примере одного образовательного учреждения - школы № 31 (с учетом полного штатного состава, отсутствия совмещения у всех сотрудников столовой образовательного учреждения) рассмотрели для каждой должности трудовые обязанности, которые характеризуются наибольшим затраченным временем на их выполнение за анализируемый период. С целью сокращения затрат на вспомогательное время, время обслуживания рабочего места, подготовительно-заключительное и основное время были предложены мероприятия по оптимизации рабочего времени: часть должностных обязанностей автоматизировать, а часть переложить на другие должности для повышения производительности труда персонала.

Ключевые слова: рабочее время, трудовые обязанности, столовая, образовательные учреждения, основное и вспомогательное время, хронометраж, затраты рабочего времени, трудовые процессы, ресурсы, оптимизация.

RESEARCH OF THE STRUCTURE OF LABOR PROCESSES OF SCHOOL CANTENEN STAFF

© The Author(s) 2025

KOSTINA Natalia Gennadiyevna, candidate of technical sciences,
associate professor of Technology and Organization of Public Catering Department
Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, street Krasnaya, 6, e-mail: oliegh.kostin@inbox.ru)

KURAKIN Mikhail Sergeevich, doctor of technical sciences, docent,
professor of Technology and Organization of Public Catering Department
Kemerovo State University

(650000, Russia, Kemerovo, street Krasnaya, 6, e-mail: kurakin1979@mail.ru)

GRIGORIEVA Roza Zavdyatovna, candidate of technical sciences, docent,
associate professor of Technology and Organization of Public Catering Department
Kemerovo State University
(650000, Russia, Kemerovo, street Krasnaya, 6, e-mail: roza-grigoreva@yandex.ru)

Abstract. The study of labor processes and working time costs allows us to solve most problems related to the rational use of resources and the organization of efficient production. The purpose of the study is to study the detailed structure of the timing of working hours for the main staffing units of school canteens in Kemerovo and to develop corrective measures to increase staff productivity. The food units of school canteens of educational institutions were selected taking into account the number of schoolchildren studying there. Actual observation of working time was carried out using a standardized method of recording the timing of various types of activities directly at workplaces in school canteens. Using the example of one educational institution - school № 31 (taking into account the full staff, the lack of combination of all employees of the canteen of the educational institution), we examined for each position the job duties that are characterized by the greatest time spent on their implementation during the. In order to reduce the costs of auxiliary time, workplace maintenance time, preparatory-final and main time, measures were proposed to optimize working time: automate some job responsibilities, and transfer some to other positions to increase staff productivity.

Keywords: working time, labor duties, canteen, educational institutions, main and auxiliary time, timing, working time costs, labor processes, resources, optimization.

Для цитирования: Костина Н.Г. Исследование структуры трудовых процессов персонала школьных столовых / Н.Г. Костина, М.С. Куракин, Р.З. Григорьева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 169-175. – EDN: BMDEES.

Введение. Для оптимального применения ресурсов на любом предприятии пищевой промышленности и общественного питания необходимо системно анализировать их структуру. Развитие в России рыночных отношений способствовало ослаблению внимания руководящих должностей к применению одного из основных производственных ресурсов – рабочего времени [1, 2]. Причиной этого стало закрытие на действующих предприятиях отделов и сокращение должностей, занимающихся организацией и нормированием труда. Таким образом, функциональная система управленческой деятельности производством потеряла значительный блок задач, что повлияло на эффективность производства в целом. Осознав, что рабочее время – это один из важных ресурсов наравне с финансами и сырьем, руководители предприятий индустрии питания стали более внимательно обращаться с ним, что способствует увеличению эффективности производства и повышает экономическое развитие предприятия в целом [3-12].

Для рационального использования трудовых ресурсов, повышения производительности труда, улучшения деятельности структур предприятий индустрии питания, необходимо более детально изучать трудовые процессы и затраты рабочего времени. Без подобного рода исследований невозможно принятие взвешенных и обоснованных управленческих решений [13-18]. Информация, полученная в результате подобных исследований, может быть использована для улучшения процессов нормирования труда, обеспечения равномерного и оптимального распределения трудовых обязанностей и норм, не имеющих обоснования на затраты тех или иных производственных и обслуживающих процессов, а также поможет выявить причины значительных невыполнений или перевыполнений

данных норм.

Цель данного исследования: определить детальную структуру хронометража затрат рабочего времени для основных штатных единиц школьных столовых (зав. производством, повара, официанта, мойщика столовой посуды, кухонного работника и дозировщика) г. Кемерово и разработать корректирующие мероприятия по повышению производительности труда персонала.

Методология. Исследования проводили в школьных столовых г. Кемерово: № 31 (количество питающихся 801), № 60 (количество питающихся 196), № 69 (количество питающихся 426), № 89 (количество питающихся 1303). Указанные школы, как видим, отличаются количеством питающихся учеников. Объектами исследования были выбраны: рабочее время работников, занятых в приготовлении пищи и обслуживании учащихся рассматриваемых школ, меню столовой, количество реализуемых блюд.

Данной работе предшествовали исследования по определению численного и должностного состава работников школьных столовых (Костина Н.Г., Куракин М.С., Григорьева Р.З. Изучение вопроса рационального использования персонала школьных столовых Г. Кемерово // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2024. Т. 13, № 3(67). С. 96-103).

Для этого были использованы:

– расчетный метод определения количества работников производства по нормам времени на изготовление единицы изделия (коэффициенту трудоемкости блюд) [19];

– фактическое наблюдение методом «фотографии рабочего процесса».

В ходе работы были отмечены работы по совмещению обязанностей дозировщика (Тсовд), буфетчика (Тсовб), мойщика столовой посуды (Тсовм),

повара (Тсовп), официанта (Тсовоф), заведующего производством (Тсовз), кухонного работника (Тсовк) (табл. 1) [20].

Полученные в результате хронометража данные

дополнительно верифицировались.

На основании проведенных исследований установлены выполняемые обязанности персонала и их структура по видам затрат рабочего времени.

Таблица 1 – Классификация затрат рабочего времени

РАБОЧЕЕ ВРЕМЯ					ПЕРЕРЫВЫ (Тпер)
ВРЕМЯ РАБОТЫ					
производительная работа (основная)			работа по совмещению (Тсов)		
подготовительно-заключительное время (Тпзв)	оперативное время		время обслуживания рабочего места (Тобс)	Тсовд, Тсовм, Тсовб, Тсовз, Тсовп, Тсовоф, Тсовк	
	основное время (Тосн)	вспомогательное время (Твсп)			

Результаты. Для повышения производительности труда и рационального использования персонала пищевых блоков школьных столовых на первом этапе исследования необходимо более детально оценить средние удельные веса в структуре хронометража, приходящиеся на разные виды затрат рабочего времени (трудовые процессы), включая выполнение работ по совмещению для разных должностей.

В таблице 2 представлены диапазоны средних удельных весов в структуре хронометража рабочего времени, приходящиеся на разные виды затрат рабочего времени персонала анализируемых школьных столовых, включая выполнение работ по совмещению.

На следующем этапе исследования было выбрано одно образовательное учреждение – школа № 31 (с учетом полного штатного состава, отсутствия совмещения у всех сотрудников столовой

образовательного учреждения). На этом примере рассмотрели для каждой должности трудовые обязанности, которые характеризуются наибольшим затраченным временем на их выполнение за анализируемый период, и в случае необходимости, предложили для них оптимизацию рабочего времени. Выделили 10 наименований деятельности (трудовых обязанностей с учетом времени на обед).

В таблицах 3-8 представлены наиболее затратные трудовые обязанности для зав. производством, повара, официанта, кухонного работника, мойщика столовой посуды и дозировщика.

Таким образом, наиболее затратными из представленных трудовых обязанностей зав. производством являются работы по обслуживанию покупателей в буфете, заполнению журналов, нахождению в обеденном зале во время кормления, контроль за работой официантов и приём пищи.

Таблица 2 – Средние удельные веса рабочего времени работников по видам затрат, %

Должность	Основное время (Тосн)	Вспомогательное время (Твсп)	Подготовительно-заключительное время (Тпзв)	Время обслуживания рабочего места (Тобс)	Время перерывов (Тпер)	Работа по совмещению (Тсов)
Зав. производством	от 40 до 50	от 6 до 10	от 10 до 12	-	от 3 до 6	от 22 до 40
Повар	от 44 до 62	от 14 до 19	от 8 до 12	от 4 до 12	от 3 до 9	от 1 до 16
Официант	от 62 до 78	от 3 до 10	от 5 до 7	-	от 5 до 8	от 1 до 24
Кухонный работник	от 67 до 75	от 14 до 19	от 0 до 2	от 1 до 5	от 7 до 14	от 4 до 9
Мойщик столовой посуды	от 58 до 87	от 0 до 2	от 4 до 13	от 1 до 4	от 5 до 8	от 1 до 23
Дозировщик	от 64 до 73	-	от 4 до 6	от 11 до 15	от 6 до 11	от 1 до 9

Таблица 3 – Трудовые обязанности зав. производством

Виды затрат рабочего времени	Трудовые обязанности	Среднее значение за исследуемый период, мин.
Тсовб	Вежливое обслуживание посетителей (обслуживание в буфете)	77,0
Твсп	Заполнение журналов	46,8
Тосн	Нахождение в обеденном зале во время кормления	44,6
Тосн	Контроль за работой официантов (персонала)	35,4
Тпер	Обед	34,4
Тосн	Заполнение фактур при приеме товаров от поставщиков	29,2
Тосн	Передача остатков в отдел снабжения	24,0
Тсовб	Оформление витрины и прилавка	20,4
Тосн	Заполнение расходов	20,0
Тосн	Прием продуктов от поставщиков	18,2

Таблица 4 – Трудовые обязанности поваров

Виды затрат рабочего времени	Трудовые обязанности	Среднее значение за исследуемый период, мин.
Тосн	Порционирование блюд в тарелки, в термоконтейнер	89,9
Тосн	Приготовление сладких блюд	36,2
Тпер	Обед	35,2
Тобс	Уборка рабочего места (мытьё, дезинфекция)	29,7
Тосн	Формовка изделий	25,6
Тпзв	Подготовка сырья и продуктов на следующий день	23,6
Тосн	Нарезка филе рыбы на порции	21,0
Тосн	Измельчение на мясорубке	20,8
Тосн	Закладка продуктов для супов и варка	17,2
Тосн	Нарезка лука для фарша	17,0

Таблица 5 – Трудовые обязанности официантов

Виды затрат рабочего времени	Трудовые обязанности	Среднее значение за исследуемый период, мин.
Тосн	Сервировка обеденных столов	85,5
Тосн	Освобождение посуды от остатков пищи	71,5
Тосн	Нарезка хлеба	56,2
Тосн	Мытьё пола в обеденном зале	42,6
Тпер	Обед	39,9
Тосн	Уборка обеденных столов	38,2
Тосн	Раскладывание столовых приборов на обеденные столы	27,3
Тосн	Порционирование холодных закусок, напитков, салатов	25,2
Тосн	Порционирование супа	19,6
Тосн	Дезинфекция обеденных столов	18,1

Таблица 6 – Трудовые обязанности кухонного работника

Виды затрат рабочего времени	Трудовые обязанности	Среднее значение за исследуемый период, мин.
Тосн	Мытьё гастроемкостей	75,6
Тосн	Приготовление горячих блюд (помощь)	66,6
Тосн	Мытьё бачков	48,8
Тпер	Обед	46,2
Тпзв	Выгрузка продуктов из тары поставщика	39,2
Тосн	Мытьё пола всех производственных помещений	33,8
Тосн	Мытьё металлического инвентаря	27,4
Тосн	Мытьё стен, стеллажей	24,8
Тосн	Мойка моечных ванн	23,2
Тосн	Мытьё фруктов и овощей	21,2

Таблица 7 – Трудовые обязанности мойщика столовой посуды

Виды затрат рабочего времени	Трудовые обязанности	Среднее значение за исследуемый период, мин.
Тосн	Мытьё, дезинфекция тарелок, салатников, стаканов, столовых приборов	321,6
Тосн	Доставка столовой посуды в горячий и холодный цеха	33,8
Тосн	Пополнение емкостей для столовых приборов на раздаче	31,0
Тосн	Зачистка тарелок и стаканов	27,6
Тосн	Мытьё банок для суточных проб	24,2
Тпер	Обед	22,0
Тосн	Мытьё кассет для столовых приборов	15,2
Тосн	Мытьё гастроемкостей	13,2
Тпер	Простой	11,8
Тосн	Подготовка машины	11,2

Таблица 8 – Трудовые обязанности дозировщика

Виды затрат рабочего времени	Трудовые обязанности	Среднее значение за исследуемый период, мин.
Тосн	Сервировка обеденных столов (помощь)	119,4
Тосн	Вежливое обслуживание посетителей	91,0
Тосн	Порционирование комплексов	55,2
Тосн	Передача грязной посуды в моечную	47,6
Тпер	Обед	42,4
Тобс	Подготовка линии раздачи	42,2
Тосн	Ведение учета питающихся	34,4
Тосн	Уборка обеденных столов (помощь)	29,2
Тосн	Доставка посуды на раздачу, обеспечение запас посуды	10,8
Тпер	Перекур	10,0

Из данных таблицы 4, можно сделать вывод, что повар больше всего тратит время в день на выполнение работ по порционированию блюд в тарелки (термоконтейнеры), приготовлению сладких блюд и на приём пищи.

Официант тратит больше всего времени в день на выполнение работ по сервировке обеденных столов, освобождению посуды от остатков пищи, нарезке хлеба, мытью пола в обеденном зале, приём пищи и уборке обеденных столов.

Таким образом, кухонный работник наибольшее количество времени затрачивает на выполнение работ по мытью гостиничных, приготовлению горячих блюд (помощь), мытью бачков, выгрузке продуктов из тары поставщика, мытью пола всех производственных помещений и приём пищи.

Наиболее затратными из представленных трудовых обязанностей мойщика столовой посуды являются работы по мытью, дезинфекции тарелок, салатников, стаканов, столовых приборов, доставке столовой посуды в горячий и холодный цехи, пополнению емкостей для столовых приборов на раздаче.

Таким образом, дозировщик основную часть трудового времени тратит на выполнение работ по сервировке обеденных столов (помощь), вежливому обслуживанию посетителей, порционированию комплексов, передаче грязной посуды в моечную, ведению учёта питающихся, подготовке линии раздачи, а также на приём пищи.

Обсуждение. По результатам исследования установлено, что в структуре фактических затрат рабочего времени преобладает время основной работы, которое составило 45-87%, время работы по совмещению – 1-40%, на время перерывов приходится 3-14% (в зависимости от должности). Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации [21] работнику должен предоставляться перерыв для отдыха и питания продолжительностью не менее 30 минут и не более двух часов. Из фактического баланса времени, следует, что работники школьных столовых затрачивают на перерыв и обед в среднем 22,3-36,8 минут в зависимости от должности, что не нарушает трудовой кодекс. Необходимо отметить, что больше всего времени тратит на прием пищи и

перекур дозировщик (52,4 минуты). Это более чем в два раза превышает время, которое затрачивает на данный процесс мойщик столовой посуды. Полагаем, что регулирование продолжительности перерывов должно опираться на: учет совмещения должностных обязанностей персоналом, численность питающихся в конкретной школе и опыт (стаж) работы сотрудника.

Больше всего на выполнение работ по совмещению тратит зав. производством (табл. 2), в среднем от 22 до 40 % от общей средней продолжительности рабочего дня. При наблюдении в данной конкретной школе зафиксированы выполнения работ зав. производством по совмещению со следующими должностями: буфетчик, дозировщик, кухонный работник, мойщик столовой посуды, официант и повар, в зависимости от школьного заведения.

Можно отметить, что наибольшим затраченным средним временем на выполнение трудовых обязанностей за анализируемый период характеризуется деятельность, связанная с основным временем (Тосн) (табл. 3-8). Несмотря на это, зав. производством, кроме того, что до 40% своего рабочего времени тратит на совмещение деятельности с другими должностями, в среднем 46,8 минут затрачивает на заполнение журналов (Твсп). Повар, в свою очередь, в среднем затрачивает до 29,7 минут на уборку рабочего места (мытьё, дезинфекция) (Тобс), кухонный работник 39,2 минуты уделяет выгрузке продуктов из тары поставщика (Тпзв), а дозировщик тратит около 42,2 минут на подготовку линии к раздаче (Тобс). С целью сокращения затрат на вспомогательное время (Твсп), время обслуживания рабочего места (Тобс), подготовительно-заключительное время (Тпзв) и основное время (Тосн) предлагаем оптимизировать некоторые трудовые функции (табл. 9).

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

– в структуре реальных затрат рабочего времени сотрудников школьных столовых возможно выделить три основных компонента: наибольший удельный вес зафиксирован при выполнении работ, приходящихся на время основной деятельности, их величина составляет от 45 до 87%; далее следует

время, затрачиваемое на совмещение обязанностей с другими должностями, их значение колеблется от 1 до 40%; и доля времени, которая приходится на перерывы, варьируется в диапазоне от 3 до 14%;

– заведующий производством столовой школы

№ 31 до 40% своего рабочего времени тратит на совмещение деятельности с другими должностями, а также в среднем 46,8 минут затрачивает на заполнение журналов (Твсп), то есть более 10% тратит на вспомогательное время.

Таблица 9 – Предложения по оптимизации/рационализации структуры рабочего времени

Должность	Наименование трудовых обязанностей	Предложения по оптимизации/рационализации
Зав. производством	Вежливое обслуживание посетителей (Тсовб)	Принять в численный штат буфетчика, установление вендинговых аппаратов
	Заполнение журналов (Твсп)	Использование информационных технологий (специализированные программы и приложения) для ведения делопроизводства и выполнения регламентов организации работы поваров
	Нахождение в обеденном зале во время кормления (Тосн)	Установление в обеденном зале систем видеонаблюдения
	Контроль за работой официантов (персонала) (Тосн)	Установление в обеденном зале и производственных цехах систем видеонаблюдения
Повар	Порционирование блюд в тарелки, в термоконтейнер (Тосн)	Передать данную обязанность дозировщику, установление систем автоматической дозировки
	Уборка рабочего места (мытьё, дезинфекция) (Тобс)	Переложить обязанности на кухонного работника, использование профессиональных пароочистителей и ультрафиолетовой дезинфекции
Официант	Сервировка обеденных столов (Тосн)	Привлечение обучающихся для сервировки столов
	Уборка обеденных столов (Тосн)	Привлечение обучающихся для уборки столов
	Мытьё пола в обеденном зале (Тосн)	Переложить данную обязанность на уборщицу
	Нарезка хлеба (Тосн)	Приобретение хлебoreзки
Кухонный работник	Мытьё гастроемкостей (Тосн)	Применение машины для мойки гастроемкостей
	Мытьё пола всех производственных помещений (Тосн)	Переложить данную обязанность на уборщицу
Мойщик столовой посуды	Мытьё, дезинфекция тарелок, салатников, стаканов, столовых приборов (Тосн)	Применение посудомоечной машины
	Доставка столовой посуды в горячий и холодный цеха (Тосн)	Использование сервировочных тележек
	Пополнение емкостей для столовых приборов на раздаче (Тосн)	Привлечение обучающихся для сервировки столов
Дозировщик	Сервировка обеденных столов (помощь) (Тосн)	Привлечение обучающихся для сервировки столов
	Передача грязной посуды в моечную (Тосн)	Использование сервировочных тележек
	Ведение учета питающихся (Тосн)	Использование информационных технологий (специализированные программы и приложения) для ведения делопроизводства

На основании проведенных исследований предлагаем часть должностных обязанностей автоматизировать, а часть переложить на другие должности с целью оптимизации производственных процессов. Считаем целесообразным разработать стандарты для выполнения отдельных производственных операций. Перспективным представляется внедрение в производственный процесс периодических самофотографий рабочего времени, при выполнении которых сотрудники самостоятельно ведут фиксацию трудовых обязанностей и их продолжительности. Данное новшество позволит быстро устанавливать определённые нерациональные действия в течение рабочего времени. Дополнительно оно сможет повысить стимулы сотрудников предприятия к качественному выполнению своей работы с упором на экономии ресурсов времени.

Перспективным считаем и дальнейшее тиражирование примененных методов и подходов к оценке

структуры хронометража затрат рабочего времени в других школьных образовательных учреждениях для повышения эффективности административных и производственных процессов на предприятиях индустрии питания, что будет способствовать снижению операционных расходов и повышению качества обслуживания учащихся школьных столовых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Bogatyreva I.V., Ilyukhina L.A., Simonova M.V., Kozhukhova N.V. Estimation of the Efficiency of Working Time Usage as a Factor of Sustainable Increase of Labor Productivity // В сборнике: SHS Web of Conferences. The conference proceedings. Samara State University of economics, 2019. – P. 06002. – DOI: 10.1051/shsconf/20196206002.
2. Калашников М.Ю. Затраты рабочего времени всегда в фокусе внимания // Экономика железных дорог. 2023. – № 6. – С. 74-80. – EDN MIACOH.
3. Лаврова З.И., Дарбаа Ч.Ю. Анализ состояния нормирования труда на промышленном предприятии и анализ затрат рабочего времени сотрудника // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и

дизайна. Серия 3: Экономические, гуманитарные и общественные науки. 2024. – № 1. – С. 48-54. – DOI 10.46418/2079-8210_2024_1_8. – EDN VCIHLS.

4. Durana C., Cetindereb A., EmreAksuc Y.: Productivity improvement by work and time study technique for earth energy-glass manufacturing company. *Procedia Economics and Finance*, 2015. – 26. – P. 109-113. – DOI: 10.1016/S2212-5671(15)00887-4.

5. Mupepi M. Effective talent management strategies for organizational success. *Advances in Human Resources Management and Organizational Development Book Series*, 2017. – P. 309-319. – DOI:10.4018/978-1-5225-1961-4.

6. Богатырева И.В., Кожухова Н.В., Железникова Е.П. Анализ современного состояния производительности труда в России // *Экономика труда*. – 2018. – № 3 (5). – С. 683-698. – DOI: 10.18334/et.5.3.39239.

7. Оценка персонала. Сбалансированная система показателей: практическое пособие / Хруцкий В.Е., Толмачев Р.А., Хруцкий Р.В. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 203 с. – (Профессиональная практика). – ISBN 978-5-534-16778-8. – Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/539479> (дата обращения: 19.08.2024).

8. Kuchina S., Havrys O. Labor cost rates and their characteristics // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Серія: Економічні науки, 2022. – № 2. – P. 33-37. – DOI 10.20998/2519-4461.2022.2.33. – EDN HJVKHG.

9. Lawrence S.A. *Work measurement and methods improvement*. – New York: Wiley-Interscience, 2000. – 299 p.

10. Sumanth David J. *Total Productivity Management: a Systemic and Quantitative Approach to Compete In Quality, Price, and Time*. Boca Raton, Fla.: St. Lucie Press, 1998. – 407 p.

11. Беляев В.И., Мищенко В.В., Мищенко Вал.В. Нормирование труда и исследование затрат рабочего времени: забытые категории экономической науки // *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. – 2019. – № 45. – С. 19-37. – DOI: 10.17223/19988648/45/2.

12. Данилова Л.Ю. Разработка методики для изучения затрат рабочего времени в научной библиотеке // *Библиосфера*. – 2020. – № 2. – С. 24-34. – DOI 10.20913/1815-3186-2020-2-24-34. – EDN KJLRNL.

13. Омельченко И.Б. Влияние нормирования труда на рост его производительности // *Социально-трудовые исследования*. – 2019. – № 1. – С. 31-43.

14. Погребцова Е.А. Нормирование труда в сельском хозяйстве: исторический аспект, современное состояние и пути совершенствования // *Экономика труда*. – 2021. – № 12 (8). С. 1527-1536. – DOI: 10.18334/et.8.12.113967.

15. Park S., Yaduma N., Lockwood A.J., Williams A.M. Demand fluctuations, labour flexibility and productivity. *Annals of Tourism Research*, 2016, 59. – P. 93-112. – DOI: 10.1016/j.annals.2016.04.006.

16. PremVrat, Sardana G.D., Sahay B.S. *Productivity Management: A Systems Approach*. Narosa Publishing House, 1998. – 326 p.

17. Устинова Ю.В., Ермолаева Е.О., Чистяков А.М., Никифорова Ю.Д. Структура затрат рабочего времени инженера-химика на предприятиях пищевой промышленности // *Пищевая промышленность*. – 2020. – № 9. – С. 41-44. – DOI 10.24411/0235-2486-2020-10096. – EDN XISUGV.

18. Корнилова А.С. Экономическое обоснование мероприятий по повышению эффективности использования рабочего времени горничных отеля // *Студенческая наука – первый шаг в академическую науку: Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции с участием школьников 10-11 классов. В 3-х частях, Чебоксары, 02-03 марта 2023 года. Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2023. – С. 546-550. – EDN UETISC.*

19. Проектирование предприятий общественного питания с основами AutoCAD: Учебник/ Ястина Г.М., Несмелова С.В. Санкт-Петербург: Троицкий мост. 2014. – 228 с.

20. Организация производства на предприятиях общественного питания: Учебник/ Радченко Л.А. Ростов н/Д: Феникс. – 2006. – 352 с.

21. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-ФЗ (ред. от 26.12.2024) // *Собрание законодательства РФ*.

Статья поступила в редакцию 03.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 663.143.2

EDN: CORDWX

ПРИМЕНЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГИДРОЛИЗАТОВ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ПРОБИОТИЧЕСКИХ ДРОЖЖЕЙ *SACCHAROMYCES BOULARDII*

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8084-2655

AuthorID: 1263427

ORCID: 0000-0001-6179-2265

ScopusID: 58024238800

АНДРЕЕВА Анастасия Сергеевна, аспирант, доцент практики,

заведующая лабораторией факультета биотехнологий

Национальный исследовательский университет ИТМО

(197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, e-mail: aandreeva@itmo.ru)

ORCID: 0000-0003-4830-6298

ScopusID: 57205639119

БЫЧКОВА Елена Сергеевна, доктор технических наук, ординарный доцент факультета биотехнологий

Национальный исследовательский университет ИТМО

(197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, e-mail: esbychkova@itmo.ru)

ORCID: 0009-0002-2184-7000

АРЕФЬЕВА Елизавета Сергеевна, студент факультета биотехнологий

Национальный исследовательский университет ИТМО

(197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, e-mail: arefevaelizaveta29@gmail.com)

Аннотация. В ходе работы был исследован метаболизм штамма *Saccharomyces boulardii* Y-3925 на жидких и плотных питательных средах с добавлением разных растительных гидролизатов. Оценка эффективности внесения дополнительного компонента в составе жидких сред проводилась при помощи таких методов, как фотометрия, рефрактометрия, электрометрия и микроскопия. Анализ плотных сред с добавочными компонентами производился с помощью оптических методов измерения размера колоний штамма и площади его распространения на чашках Петри. Дополнительным фактором служило количество жизнеспособных клеток после культивирования. В результате культивирования *Saccharomyces boulardii* на питательных средах были получены зависимости *pH*, концентрации сухого вещества (СВ) и оптической плотности (OD_{600}) от времени, а также количество жизнеспособных клеток после проведения эксперимента. Наибольшая концентрация жизнеспособных клеток (93 и 97 млн/мл) наблюдается на средах с добавлением гидролизатов *Multy Dex GS* сироп глюкозный сухой с *pH*=5,4 и *MultyDex GS* сироп глюкозный сухой с *pH*=5,3. Результаты исследований продемонстрировали влияние гидролизатов *Multy Dex GS* сироп глюкозный сухой с *pH*=5,4 и *MultyDex GS* сироп глюкозный сухой с *pH*=5,3 на ростовые свойства дрожжей, что подтверждает целесообразность их использования в производстве многокомпонентной питательной среды для культивирования *Saccharomyces boulardii*. Внесение подобных компонентов в субстрат для промышленного культивирования может повысить его экономическую эффективность за счет снижения затрат на сырье и улучшения выхода целевого продукта. Цель исследования – оценить потенциал растительных гидролизатов в качестве добавочного компонента питательных сред для культивирования штамма дрожжей *Saccharomyces boulardii* Y-3925. Исследование осуществлялось в условиях лабораторного опыта, заложенного в НИУ ИТМО, расположенного в г. Санкт-Петербург.

Ключевые слова: растительные гидролизаты, пробиотики, дрожжи, культивирование, добавочный компонент, питательные среды, биотехнология, биомасса, питательная среда, инокулят.

APPLICATION OF PLANT HYDROLYSATES FOR THE CULTIVATION OF PROBIOTIC YEAST *SACCHAROMYCES BOULARDII*

© Author(s) 2025

ANDREEVA Anastasia Sergeevna, postgraduate student, associate professor of practice,

head of the laboratory at the Faculty of Biotechnology

ITMO University

(197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr, 49, email: aandreeva@itmo.ru)

BYCHKOVA Elena Sergeevna, doctor of technical sciences, tenured associate professor, faculty of Biotechnology

ITMO University

(197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr, 49, email: esbychkova@itmo.ru)

AREFYEVA Elizaveta Sergeevna, student of the Faculty of Biotechnology

ITMO University

(197101, Russia, Saint-Petersburg, Kronverksky pr, 49, email: arefevaelizaveta29@gmail.com)

Abstract. In the course of the work, the metabolism of the *Saccharomyces boulardii* Y-3925 strain on liquid and dense nutrient media with the addition of various plant hydrolysates was studied. The efficiency of adding an additional

component to liquid media was evaluated using such methods as photometry, refractometry, electrometry and microscopy. The analysis of dense media with additional components was carried out using optical methods for changing the size of the strain colonies and the area of its distribution on Petri dishes. An additional factor was the number of viable cells after culture. As a result of the cultivation of *Saccharomyces boulardii* on culture media, the dependencies of pH, dry matter concentration and optical density on time, as well as the number of viable cells after the experiment were obtained. The highest concentration of viable cells (93 and 97 million/ml) is observed on media with the addition of hydrolysates *Multy Dex GS* Dry Glucose Syrup with $pH = 5.4$ and *MultyDex GS* Dry Glucose Syrup with $pH = 5.3$. The results of the studies demonstrated the effect of *Multy Dex GS* dry glucose syrup with $pH = 5.4$ and *MultyDex GS* dry glucose syrup with $pH = 5.3$ hydrolysates on the growth properties of yeast, which confirms the expediency of their use in the production of a multicomponent nutrient medium for the cultivation of *Saccharomyces boulardii*. The introduction of such components into the substrate for industrial cultivation can increase its economic efficiency by reducing the cost of raw materials and improving the yield of the target product. The aim of the study was to assess the potential of plant hydrolysates as an additive component of culture media for the cultivation of the yeast strain *Saccharomyces boulardii* Y-3925. The study was carried out in the conditions of laboratory experiments laid down at the National Research University ITMO, located in St. Petersburg.

Keywords: plant hydrolysates, probiotics, yeast, cultivation, additive component, culture media, biotechnology, biomass, culture medium, inoculum.

Для цитирования: Андреева А.С. Применение растительных гидролизатов для культивирования пробиотических дрожжей *Saccharomyces Boulardii* / А.С. Андреева, Е.С. Бычкова, Е.С. Арефьева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 176-183. – EDN: CORDWX.

Введение. В настоящее время разнообразие субстратов и сред, применяемых в биотехнологии, постоянно растет. В процессе развития промышленных технологий происходит накопление новых видов отходов, которые, с помощью биотехнологических методов, можно обработать и преобразовать в полезные продукты, такие, как, биогаз, биоэтанол и биоуголь, а также различные ферменты и органические кислоты [1]. С одной стороны, стремительное развитие биотехнологических секторов сталкивается с проблемой истощения традиционных источников сырья, что требует расширения сырьевой базы. С другой стороны, увеличение объемов накопленных отходов подчеркивает необходимость разработки новых технологических решений для их эффективной переработки.

В качестве сырья для приготовления питательных сред для культивирования микроорганизмов могут быть использованы отходы зерновых культур, остающиеся в результате работы различных производств. Зерновые культуры характеризуются богатым химическим составом, способным удовлетворить питательные потребности ряда микроорганизмов, в частности дрожжей, например промышленных штаммов продуцентов *C. utilis*, *C. scottii* и *C. tropicalis* и кормовых дрожжей для животноводства [2, 3]. Также стоит учитывать, что в их состав входят неперевариваемые углеводы, которые оказывают положительный эффект на рост пищевых бактериальных культур, таких как лактобактерии и бифидобактерии, что подтверждают многие исследователи (Конь И. Я. [4], Бельмер С. В., Гасилина Т.В. [5]). На данный момент в качестве биотехнологических субстратов активно используются различные органические отходы, такие как целлюлоза, гидролизаты полисахаридов и древесины. Например, начиная с 1970-х годов, древесные

гидролизаты применяются для производства белка из одноклеточных организмов. Также еще в 90-е года прошлого века, как отмечалось Воловой Т. Г. [6], начали с успехом применяться гидролизаты торфа, что позволило снизить стоимость аминокислотных препаратов в 4-5 раз. Из более современных примеров использования растительных гидролизатов в биотехнологических процессах можно отметить использование гидролизатов пшеничных отрубей в качестве сырья для биосинтеза бактериальной целлюлозы [7, 16]. Также существует множество исследований по применению гидролизатов растительного шрота в качестве источников питательных веществ и энергии для ферментации дрожжей [17], продуцирующих разные вещества, в том числе каротиноиды, *Rhodospiridium toruloides* [15].

Таким образом, использование растительных гидролизатов, полученных из вторичных продуктов переработки, в качестве дополнительного компонента для культивирования микроорганизмов является перспективным направлением, так как этот метод является экологически и экономически выгодным [13, 14].

Переработка биологических отходов различных производств требует значительных временных и материальных затрат, поэтому использование готовых продуктов в рамках данной работы позволяет сосредоточиться на основных задачах исследования. Также применение готовых гидролизатов обусловлено достижением более репрезентативных и воспроизводимых результатов исследования благодаря постоянному составу. В этом исследовании были использованы растительные гидролизаты компании *MultyDex*, которые получают путем управляемого природного процесса переработки высокоочищенного растительного сырья [8]. Они широко применяются в различных отраслях промышленности, в

частности пищевой, косметической и строительной [8].

Штамм *Saccharomyces boulardii* является первым зарегистрированным дрожжевым пробиотиком, обладающим повышенной устойчивостью к стрессам [19]. *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* – это представитель пробиотических дрожжей, которые широко используются в пищевой и фармацевтической промышленности [9, 21].

Пробиотические дрожжи отличаются от модельного штамма *Saccharomyces cerevisiae*, с которым они имеют генетическую близость [9], высокой устойчивостью к температурам и кислоте. *S. boulardii* демонстрирует лучшую устойчивость к температурным и кислотным стрессам, а также обладает высокой осмоустойчивостью [10]. Эти характеристики позволяют данному штамму сохранять жизненную активность на протяжении более длительного времени, что упрощает его хранение в рамках нашего исследования. Также известно, что *S. boulardii* обладает пробиотическими свойствами [20, 9], что обуславливает его широкое применение не только в фармации, но и в пищевой промышленности [11].

Настоящее исследование направлено на углубление знаний о применении растительных гидролизатов, которое поможет открыть новые перспективы практического применения и дальнейших исследований.

Цель исследования – оценить потенциал применения растительных гидролизатов в качестве добавочного компонента питательных сред для культивирования штамма дрожжей *Saccharomyces boulardii* Y-3925.

Задачи: провести культивирование штамма дрожжей *Saccharomyces boulardii* Y-3925 на жидких и плотных питательных средах с добавлением различных растительных гидролизатов, при помощи различных методов выявить влияние растительных гидролизатов на жизнеспособность и метаболизм штамма дрожжей *Saccharomyces boulardii* Y-3925.

Методология. Объектами исследовательской работы являются растительные гидролизаты компании *MultyDex*: GS Сироп глюкозный сухой, $pH=5,4$ (1S); Brown AG Комплексная пищевая добавка, $pH=4,8$ (2P); GS Сироп глюкозный сухой, $pH=5,3$ (3S); 18 Мальтодекстрин, $pH=5,4$ (4M).

Посевной материал был получен методом простого периодического культивирования на среде YPD (1% дрожжевого экстракта, 2% пептона, 2% декстрозы) при 28°C в течение 24 часов. В колбы был произведен посев *Saccharomyces boulardii* Y-3925 с плотной питательной среды хранения – скошенного агара, после чего полученная биомасса была перенесена в раствор 8% неохмеленного солодового суслу и помещена в шейкер-инкубатор при 120 rpm на 24 часа при температуре 28°C для повышения аэрации суслу. Следующим этапом периодического культивирования был пересев в конечный объем

среды (3000 мл) культивирование с перемешиванием, осаждение и отмывка стерильной водой инокулята.

Исследование количества жизнеспособных клеток в инокуляте проводилось методом окрашивания и оценки путем световой микроскопии при помощи бинокулярного микроскопа Zeiss Axiolab A1 при увеличении в 400 раз в камере Горяева суспензии дрожжей 1:20 (на 0,1 мл суспензии приходилось 0,9 мл воды и 1 мл метиленового синего).

Для модельного лабораторного культивирования дрожжей была выбрана жидкая синтетическая среда Ридера следующего состава в расчете на 1 литр: 20 г сахарозы; 3 г $(NH_4)_2SO_4$; 0,7 г $MgSO_4$; 0,5 г $NaCl$; 0,4 г $Ca(NO_3)_2$; 1 г KH_2PO_4 ; 0,1 г K_2HPO_4 . Для приготовления плотной среды к этому составу было добавлено 2% бактериологического агар-агара. Функциональный компонент в виде растительного гидролизата вводился в питательные среды замещая 5% сахарозы. Таким образом, культивирование проводилось на 5 различных жидких и плотных средах, с повторностями эксперимента и дублями образцов, для наработки достоверных данных. Исследуемые образцы: контроль – без добавления растительного гидролизата (5K); среда с заменой 5% сахарозы на сухой глюкозный сироп с $pH=5,4$ (1S); среда с заменой 5% сахарозы на комплексную пищевую добавку с начальным $pH=4,8$ (2P); среда с заменой 5% сахарозы на сухой глюкозный сироп с $pH=5,3$ (3S); среда с заменой 5% сахарозы на мальтодекстрин с $pH=5,4$ (4M).

При помощи pH -метра pH жидких и плотных питательных сред был доведен до значений, лежащих в промежутке 4,6-4,8, в соответствии с патентом [12]. Нормализация pH является важным этапом культивирования дрожжей, так как влияет на оптимум их физиологической активности.

Жидкие и плотные питательные среды стерилизовали в автоклаве при 120°C (0,1 МПа) в течение 20 минут. Стерилизация чашек Петри и дополнительного вспомогательного оборудования и расходников проводилась при 160-170°C в течение 120 минут в сухожаровом шкафу. Розлив питательных сред и посев биоматериала, проводились в соответствии с санитарными нормами работы в микробиологической лаборатории. Основной посев осуществлялся в чистой зоне с применением бокса микробиологической безопасности (БМБ-II "Ламинар-С"-1,2).

Эффективность культивирования на жидких питательных средах определяли с помощью измерения показателей оптической плотности, концентрации сухого вещества и pH . Оптическую плотность (далее OD) определяли фотометрическим методом с использованием спектрофотометра УФ (*Shimadzu UV-2600*) при длине волны $\lambda=600$ нм. Концентрацию сухих веществ, далее СВ – показатель, отражающий концентрацию сахара в растворе (выражается в градусах Брикс (°Bx), один градус которого соответствует 1 грамму сахарозы на 100 граммов

раствора), определяли рефрактометрическим методом с использованием рефрактометра PTR 46. Показатель pH определяли электрометрическим методом с использованием pH -метра 150МИ.

Весь эксперимент происходил в течение 24 часов в термостате при поддержании постоянной температуры $T=30^{\circ}\text{C}$. Значения pH , CB и OD были измерены сразу после посева инокулята, далее их измеряли каждые 2 часа. Скорость потребления субстрата определяли по формуле:

$$V_{\text{ассим}} = \frac{\Delta E}{\Delta \tau} \quad (1)$$

где $\Delta \tau$ – промежуток времени, часы; ΔE – изменение экстракта за промежуток времени $\Delta \tau$, г/100г.

Конечную степень сбраживания определяли по формуле:

$$KCC = \frac{\Delta E}{E_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где ΔE – изменение экстракта, г/100г; E_0 – начальная концентрация экстракта, г/100г.

Культивирование на плотных питательных средах длилось 8 дней в термостате при температуре 30°C . Каждые 24 часа визуально производилась фиксация изменения роста дрожжевой культуры. По окончании культивирования была произведена микроскопия прижизненных препаратов, окрашенных метиленовым синим. Анализ выросших колоний на разных средах проводился визуально.

После завершения эксперимента была проведена микроскопия клеток, культивируемых на жидких и плотных средах, для определения количества жизнеспособных клеток. Оценку микроморфологии клеток осуществляли при увеличении микроскопа в 1000 раз.

Результаты. При подсчете клеток инокулята в камере Горяева было выявлено, что общая концентрация клеток составила 185 млн/мл, концентрация мертвых клеток – 9 млн/мл. В результате концентрация жизнеспособных клеток перед засевом составила 176 млн/мл. На жидкие питательные среды был произведен посев необходимого объема био-

массы для достижения концентрации 10 млн/мл в каждой. Посев на плотные питательные среды был произведен истающим штрихом.

Жидкие среды. Результаты периодических измерений pH , CB и OD исследуемых образцов проанализированы и приведены в виде графических элементов на рисунках 1, 2, 3 соответственно.

Концентрация сахаров в растворенном виде питательной среды в процессе культивирования стабильно снижается, что говорит о интенсивном потреблении углеводной составляющей субстрата микроорганизмами, а значит и о их физиологической активности. Следует отметить, что потребление субстрата происходит стабильно, но в случае внесения добавки 4М скорость потребления и интенсивность сбраживания увеличиваются.

Для стабильного роста и нормального метаболизма дрожжей необходима слабкокислая среда. Все питательные среды предварительно стабилизировали, выравниванием pH ортофосфорной или молочной кислотой до оптимума 4,2. С течением времени культивирования pH среды изменяется стабильно. На рисунке 2 видно, что рост значений отсутствует – это говорит о высокой степени выживаемости микроорганизмов.

Оптическая плотность, косвенно отражающая количество биомассы в культуральной жидкости, пропорциональна росту дрожжей, стабильно увеличивается. Наибольшая скорость роста наблюдается на 16 и 20 час культивирования. В качестве контрольной точки измерения выступает питательная среда до сбраживания – это способствует получению более корректных данных прироста биомассы дрожжей.

На основании полученных зависимостей кинетических процессов культивирования дрожжевых клеток, в частности интенсивности изменения концентрации сухого вещества, были рассчитаны конечная степень сбраживания (KCC) и скорость потребления субстрата биомассой ($V_{\text{ассим}}$).

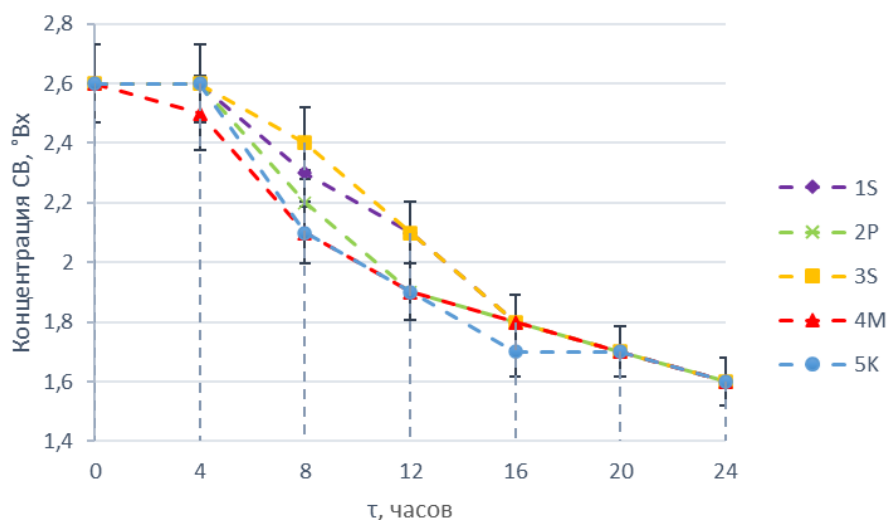


Рисунок 1 – Зависимость концентрации СВ от времени

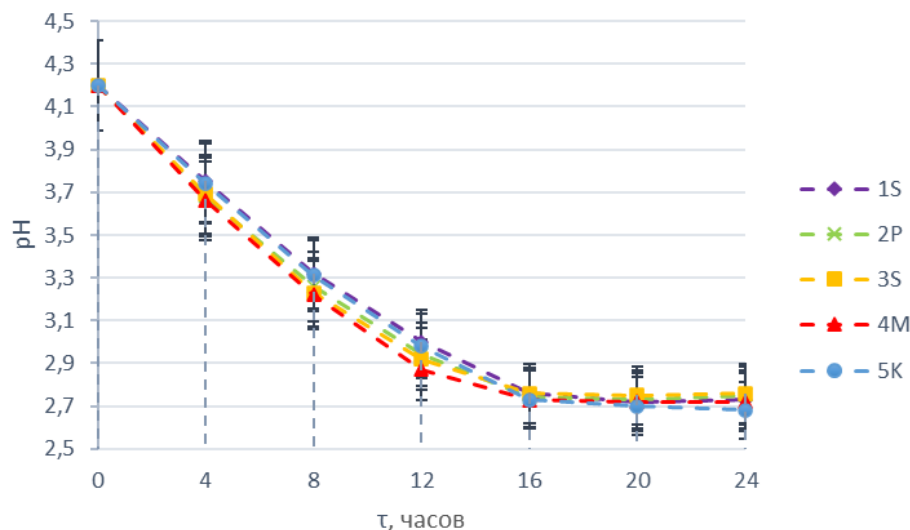


Рисунок 2 – Зависимость величины pH от времени

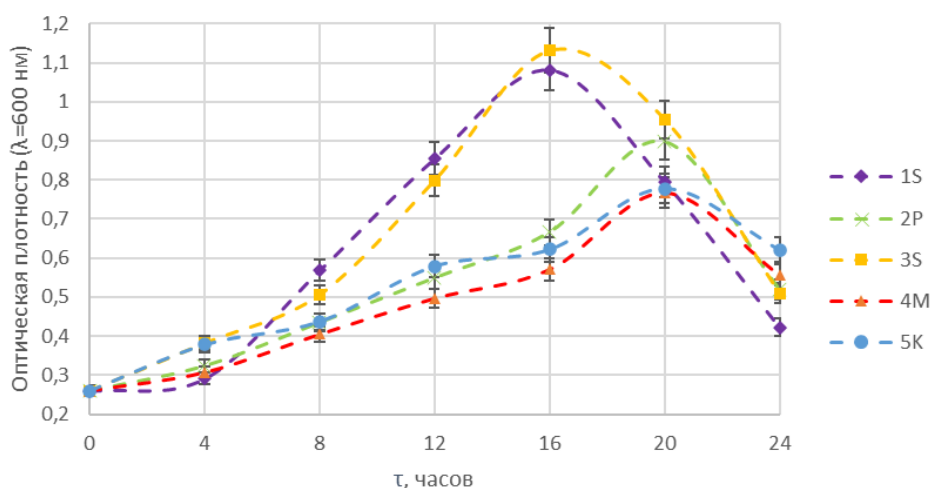


Рисунок 3 – Зависимость OD при $\lambda=600$ нм от времени

Результаты расчетов $V_{\text{ассим}}$ и КСС для каждого образца представлены в виде диаграмм скорости потребления субстрата и конечной степени сбраживания, представлены на рисунках 4 и 5. Скорость потребления субстрата отражает скорость потребляемых компонентов дрожжами в процессе культивирования. Из рисунка 4 следует, что образец 2Р является наиболее потребляемым дрожжами компонентом питательной среды по сравнению с остальными образцами.

На рисунке 5 представлена конечная степень сбраживания, отражающая максимальное количество сброженных дрожжами компонентов в процессе культивирования. Внесение дополнительного компонента – 2Р, интенсифицирует процесс потребления сахаров в субстрате, вероятно 2Р является наиболее метаболизируемым дрожжами компонентом, за счет углеводного состава, по сравнению с остальными образцами.

По истечению 24 часов инокулят с разных питательных сред, исследовался на количественное содержание млн/мл клеток, а также оценен на

наличие мертвых и физиологически не активных дрожжей

В 10 полях зрения приготовленного препарата было подсчитано число мертвых клеток. Было найдено отношение числа мертвых клеток к общему количеству клеток. Результаты подсчета клеток в камере Горяева представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Концентрация клеток в инокуляте после культивирования

Компонент питательной среды	Концентрация клеток, млн/мл	Количество мертвых клеток, %
1S	93	11,2
2P	71	19,6
3S	97	13,8
4M	48	22,3
5K	36	15,1

Наибольшая концентрация клеток (93 и 97 млн/мл) наблюдается на средах с добавлением растительных гидролизатов 1S и 3S, на этих же питательных субстратах получено большее количество физиологически жизнеспособных дрожжей.

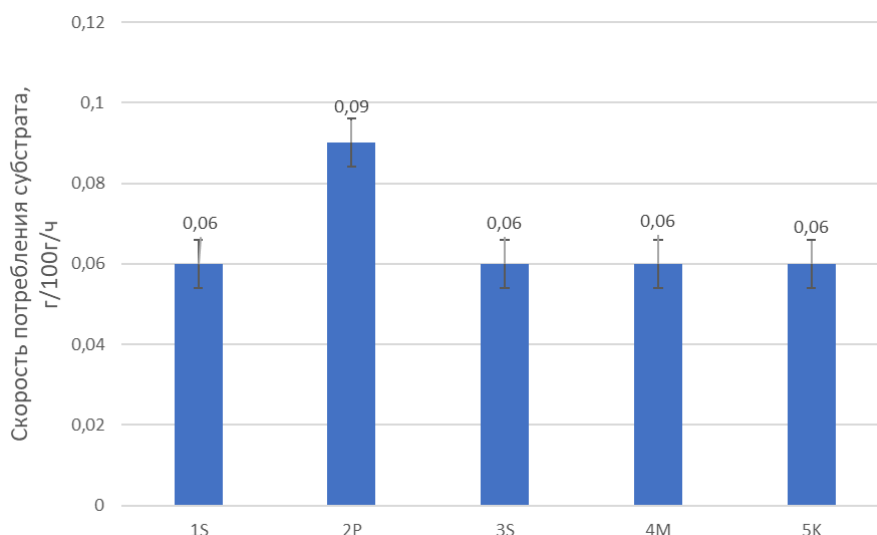


Рисунок 4 – Скорость потребления субстрата

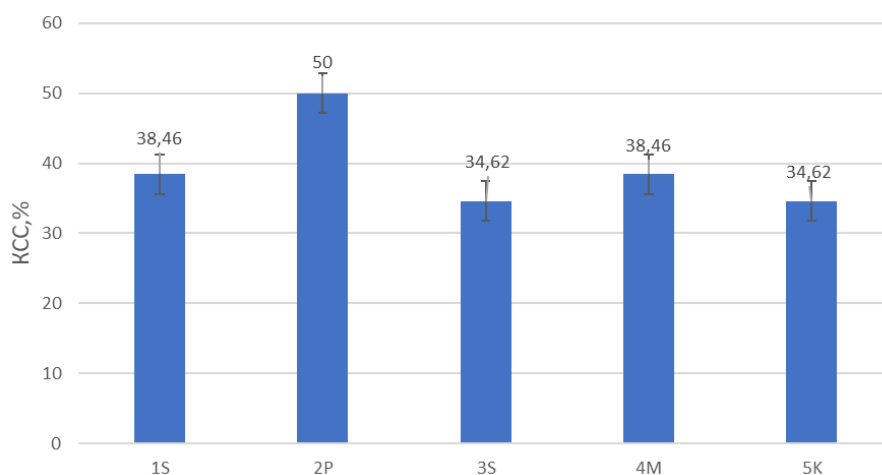


Рисунок 5 – Конечная степень сбраживания

Плотные среды. Для исследования влияния добавочных компонентов к средам на процесс хранения микроорганизмов, проведено тест культивирования-хранения на плотных питательных средах в чашках Петри. После засева культуры в разные плотные среды, в процессе инкубирования оценивали скорость роста и площадь распространения колоний.

Наибольшую площадь чашки Петри занимали колонии, выросшие на среде с добавлением 1S, в случае контрольной среды наблюдался схожий размер площади выросших колоний. Наименьшая площадь выросших колоний наблюдалась на средах с добавлением 2P и 4M.

По истечении семи суток хранения оценивалась морфология клеток. Морфология является основным показателем стабильности микроорганизмов при хранении, форма клеток ее единообразие, а также процент мертвых клеток и количество гликогена говорят о пригодности среды для сохранности генетической стойкости микроорганизма. Исследование микроморфологии показало, что во всех препаратах клетки относительно крупного размера, имеют шарообразную форму, большинство расположены поодиночке, но также могут встречаться и почкующиеся дрожжи. Результаты исследования сред при инкубации и хранении культуры дрожжей приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Морфологическое состояние клеток дрожжей при инкубации и хранении

Компонент питательной среды	Площадь распространения клеток в чашке Петри, %	Стабильность формы при хранении	Количество гликогена в клетке при хранении, %	Количество мертвых клеток после хранения, %
1S	65	однородна	77	11
2P	38	однородна	65	34
3S	51	однородна	68	16
4M	42	однородна	51	28
5K	58	однородна	61	22

Обсуждение. Установлено, что применение растительных гидролизатов в технологии культивирования имеет высокий биопотенциал, в частности, рассматриваемые компоненты углеродного происхождения увеличивают скорость сбраживания и ростовые свойства культуры. Также перспективным является направление применения гидролизатов с высоким содержанием азота. Хабулиной Н.В., Дмитриевой Ю.А. и Шишовой Е.С. [22] установлено, что ферментативный соевый гидролизат как традиционного, так и экструдированного концентрата белка, может быть использован в качестве дополнительного компонента питания для приготовления питательной среды для роста дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, однако ростовые характеристики при этом снижаются по сравнению со средой с добавлением дрожжевого экстракта. Удельная скорость роста для контрольной среды составляет $0,31 \text{ ч}^{-1}$, для сред с добавлением гидролизатов варьирует в пределах $0,14\text{--}0,17 \text{ ч}^{-1}$, степень усвоения углеводного субстрата при этом составляет 50–60%. Наблюдается аналогичное снижение ростовых характеристик, авторы полагают это может быть связано с недостаточным содержанием витаминов в белковых соевых гидролизатах. Из углеродных компонентов чаще всего применяется авторами, мука, картофельные гидролизаты и свекловичный жом. Исследователями (Валеева Р.Т., Нуретдинова Э.И., Понкратов А.С., Ананьева О.В., Шурбина М.Ю. [23]) доказана целесообразность использования гидролизатов жома свекловичного в качестве питания для культивирования спиртовых дрожжей.

Применение углеводных гидролизатов в технологии культивирования дрожжей является актуальной темой научных исследований и в производственной практике. Углеводные гидролизаты, получаемые в результате разложения растительных материалов, служат ценным источником углерода и других питательных веществ для выращивания дрожжевых культур [24]. Качество углеводных гидролизатов зависит от исходного сырья и метода их получения. Присутствие инозитола, аминокислот и других питательных веществ в составе гидролизата значительно влияет на эффективность культивирования [25]. Использование углеводных гидролизатов позволяет снизить себестоимость производства продуктов на основе дрожжей за счёт использования недорогих отходов сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности [26].

Полученные результаты в проведенном исследовании, дают возможность утверждать, что гидролизаты 1S и 3S обладают высокой эффективностью в качестве добавочных компонентов жидких и плотных питательных сред для культивирования дрожжей, что указывает на их большой потенциал внедрения в качестве дополнительного компонента питательной среды для культивирования *Saccharomyces boulardii* Y-3925.

Saccharomyces boulardii в процессе культивиро-

вания в жидкой фазе продуцируют большое количество органических кислот, вследствие чего наблюдается значительное подкисление среды. Во всех исследуемых образцах наблюдается примерно одинаковая зависимость снижения *pH* среды от времени. При достижении 16 часов наблюдается прекращение значительного понижения *pH*. На рисунках 1, 2 и 3 видно, что ферментативная активность дрожжей на питательных средах с добавлением растительных компонентов 1S, 2P, 3S и в контрольной среде лаг-фаза культуры была затянута и наблюдалась в течение первых 4 часов культивирования. Быстрая адаптация пробиотических дрожжей происходит в среде 4M потребление, снижение концентрации сухих веществ субстрата и повышение газообразования наблюдается уже через 2 часа без приточного лабораторного культивирования биомассы дрожжей.

На рисунке 3 приведен график изменения значений оптической плотности при длине волны $\lambda=600 \text{ нм}$ с течением времени. На графике видно, что повышение оптической плотности начало происходить практически сразу во всех образцах. В случае добавления 1S и 3S значительное повышение оптической плотности наблюдалось уже в первые 15 часов, в остальных образцах – только по достижении 20 часов. Следовательно, внесение растительных компонентов 1S и 3S ускоряют метаболические процессы дрожжей *Saccharomyces boulardii*. На рисунках 4–5 скорость потребления субстрата с внесением растительного компонента 2P выше, чем при внесении остальных добавок, так как скорость ассимиляции для 2P составляет $0,09 \text{ г/100г ч}$. Из этого следует меньшая продолжительность процесса культивирования в случае добавления 2P (рис. 3). Также стоит отметить, что наибольшая степень сбраживания наблюдалась в случае добавления 2P (50%). Наименьшие значения КСС были получены для 3S и 5K, но по результатам измерения оптической плотности для 3S наблюдался интенсивный прирост биомассы, это говорит о том, что растительный компонент увеличивает интенсивность генерации клеток дрожжей.

Внесение растительных гидролизатов в плотные питательные среды для длительного хранения дрожжей может увеличить срок хранения штамма в стабильном генетическом состоянии. Питательные среды с добавлением 1S и 3S подходят для активного роста и жизнедеятельности штамма дрожжей *Saccharomyces boulardii*, так как именно на них наблюдается наибольший рост колоний и наименьшее количество мертвых клеток. Анализируя комплекс показателей, отвечающих за физиологическую стойкость пробиотических дрожжей, наблюдается локальное действие добавочных компонентов на клетки. Среда с 1S и 3S показывают схожие характеристики с контрольным образцом, но стоит отметить, что компонент 1S способствует накоплению гликогена в клетке и обеспечивает наивысшую степень выжи-

ваемости культуры. Компонент 4М интенсифицирует процессы жидкофазного культивирования, но при хранении показывает отрицательные результаты – низкое распространение колоний, минимальное накопление гликогена как запасного фактора, высокую смертность дрожжевых клеток. Компонент 2Р в сравнении с другими исследуемыми образцами оказывает негативное влияние на *Saccharomyces boulardii* Y-3925, вероятно это связано с высоким содержанием мальтодекстрина в комплексной добавке, которые не ассимилируются дрожжами.

Выводы. Таким образом, следует предположить, что гидролизаты с глюкозным остатком могут локально и положительно влиять на физиологическое состояние культуры и экономический процесс кинетики культивирования биомассы дрожжей. Результаты исследования подтверждают актуальность выбранного направления исследования и служат основой для будущих разработок. В дальнейшем планируется варьировать компонентный состав питательной среды в том числе внесением гидролизатов остаточного растительного сырья, для получения необходимых характеристик дрожжей. В последующих исследованиях рассматривается разработка компонентной питательной среды для производства инокулята *Saccharomyces boulardii* Y-3925.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ng H.S., Kee P.E., Yim Hs, et al. Recent advances on the sustainable approaches for conversion and reutilization of food wastes to valuable bioproducts // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol 302:122889.
2. Меледина Т.В., Давыденко С.Г. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Морфология, химический состав, метаболизм // Учеб. пособие. СПб: Университет ИТМО. – 2015. – 88 с.
3. Позднякова О.В., Матюшев В.В., Аникиенко Т.И. Биохимия зерна, продуктов его переработки и комбикормов // Учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т. – 2009. – 198 с.
4. Конь И.Я. Углеводы: новые взгляды на их физиологические функции и роль в питании // *Вопросы детской диетологии*. – 2005. – Т. 3, №1. – С. 18-27.
5. Бельмер С.В., Гасилина Т.В. Рациональное питание и состав кишечной микрофлоры // *Вопросы детской диетологии*. – 2003. – Т. 1, №5. – С. 17-20.
6. Волова Т.Г. Биотехнология // Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук. 1999. – 252 с.
7. Погорелова Н.А., Сарницкая Н.А. Использование гидролизатов растительного сырья в биосинтезе бактериальной целлюлозы // *Модернизация, Инновации, Прогресс (МИП-V-2023): сборник научных статей по материалам V Международной научной конференции, Красноярск, 13-15 сентября 2023 года.* – Красноярск: Общественное учреждение «Красноярский краевой Дом науки и техники Российского союза научных и инженерных общественных объединений». – 2023. – С. 75-81.
8. Продукция // *MultyDex* URL: <https://multydex.ru/products/> (дата обращения: 11.11.2024).
9. Pais P. *Saccharomyces boulardii*: What Makes It Tick as Successful Probiotic? // *Journal of Fungi*. 2020. Vol. 6. – №2. – P. 78-79.
10. Avila-Reyes S. Effect of salt and sugar osmotic stress on the viability and morphology of *Saccharomyces boulardii* // *International Journal of Environment Agriculture and Biotechnology*. – 2020. Vol. 1, №3. – P. 593-602.
11. Pereira de Paula B. Technological features of *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* for potential probiotic wheat beer development // *LWT*. – 2021. – Vol. 135. – P. 1-8.
12. Способ получения питательной среды для выращивания дрожжей // *Яндекс.Патенты* URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2205870C1_20030610 (дата обращения: 05.11.2024).
13. Фиян С. Микроорганизмы с заявленными пробиотическими свойствами: обзор современной литературы. – 2014. – Т. 11, № 5. – С. 4745-4767.
14. Ho, Y.Y., Lu, H.K., Lim, Z.F.S., et al. Applications and analysis of hydrolysates in animal cell culture // *Bioresour. Bioprocess.* – 2021. – Vol. 8, №93.
15. Bertacchi, S., Bettiga, M., Porro, D., et al. Camelina sativa meal hydrolysate as sustainable biomass for the production of carotenoids by *Rhodospotidium toruloides* // *Biotechnol Biofuels*. – 2020. – Vol. 13, №47. – P. 1-10.
16. Arevalo-Gallegos A., et al. Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach – A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2017. – Vol. 99. – P. 308-318.
17. Lapena, D., Kosa, G., Hansen, L., et al. Production and characterization of yeasts grown on media composed of spruce-derived sugars and protein hydrolysates from chicken by-products // *Microbial cell factories*. – 2020. – Vol. 19, №19. – P. 1-14.
18. Болтовский В.С. Направления совершенствования процессов производства кормовых дрожжей путем переработки гидролизатов, полученных кислотным гидролизом растительного сырья // *Труды БГТУ. Серия: 2.* – 2021. – №2. – С. 13-18.
19. Gopalan S., Ganapathy S., Mitra M., Neha, Kumar Joshi D., Veligandla K., Rathod R., Kotak B. Unique Properties of Yeast Probiotic *Saccharomyces boulardii* CNCM I-745 – A Narrative Review // *Cureus*. 2023. – Vol. 15 (10): e46314.
20. Hossain M., Afrin S., Humayun S., Ahmed M., Saha B. Identification and Growth Characterization of a Novel Strain of *Saccharomyces boulardii* Isolated From Soya Paste // *Front. Nutr.* – 2020. – Vol. 7, №27.
21. Jin Y., Yu S., Liu J-J., et al. Production of neoagarooligosaccharides by probiotic yeast *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* engineered as a microbial cell factory // *Microb Cell Fact*. 2021. – Vol. 20, №160. – P. 1-10.
22. Хабибулина Н.В., Дмитриева Ю.А., Шишова Е.С. Использование соевых белковых гидролизатов в качестве компонента питательной среды для дрожжей // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. – №3-1 (22). – С. 67-69.
23. Валеева Р.Т., Нуретдинова Э.И., Понкратов А.С., Ананьева О.В., Шурбина М.Ю. Оценка гидролизатов свекловичного жома как компонентов питательных сред для культивирования спиртовых дрожжей // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2016. – Т.19, №13. – С. 161-163.
24. Wu J., et al. Utilization of lignocellulosic hydrolysates for yeast cultivation: A review // *Bioresource Technology*. – 2022.
25. Chen, Y., Liu, X. The role of hydrolysates in fermentation processes: insights and innovations // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. – 2021. – Vol. 48 (3). – P. 395-410.
26. Nascimento, F.D., et al. Strategies for improving yeast fermentation using hydrolyzed waste // *Renewable Energy*. – 2023. – Vol. 215. – P. 1245-1254.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 637.072

EDN: EPTGHP

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО МОЛОЧНОГО СЫРЬЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТВОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 6670-6391

AuthorID: 776794

ORCID: 0000-0002-7058-3817

ResearcherID: MCY-1334-2025

БОДРЯКОВА Наталия Павловна, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: bodryakova@gmail.com)*

SPIN: 9202-4435

AuthorID: 776770

ORCID: 0000-0002-3085-6577

ResearcherID: AAS-2373-2020

ScopusID: 57214721433

ЕСЕПЕНОК Константин Викторович, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: kv@esepenok.ru)*

КОНОВОДОВ Тарас Алексеевич, магистрант кафедры

«Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: tarkon9@yandex.ru)*

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной на сегодняшний день проблемы рациональной переработки животноводческой продукции, в частности молочной, для получения продуктов питания, которые не только сбалансированы по пищевой и энергетической ценности, но и способствуют сохранению здоровья населения. Молочная сыворотка, образующаяся в качестве побочного продукта при производстве белково-жировых продуктов, таких как творог и сыры, в силу своей биологической ценности является ценным сырьевым ресурсом, способным обогатить молочные продукты нутриентами, необходимыми человеку для активной жизни. Цель работы – предложить способ использования сухой творожной сыворотки, как вторичного молочного сырья в производстве творожных изделий. Объектами исследования служили образцы сырников, выработанные из обезжиренного творога, который приготовлен из смеси сырого коровьего и козьего молока в соотношениях 2:1 (образец 1) и 1:1 (образец 2). В задачи исследований входило: разработка рецептуры сырников с использованием молочной сыворотки, моделирование технологической схемы производства, установление соответствия качества и безопасности нового продукта нормативным документам. Исследования проводили согласно действующим стандартам и утвержденным методикам с применением современных методов органолептического, физико-химического и микробиологического анализа свойств сырников творожных. Заявленное технологическое решение по использованию молочной сыворотки может стать основой ресурсосберегающей технологии молочных продуктов.

Ключевые слова: вторичное молочное сырьё, молочная сыворотка, рециклинг, творожные изделия, рецептурная композиция, сырники, ресурсосберегающая технология.

NEW TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE USE OF SECONDARY DAIRY RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF CURD PRODUCTS

© The Author(s) 2025

BODRYAKOVA Nataliya Pavlovna, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of

“Technology and quality management of agricultural products named after S.A. Kaspariants”

*Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin
(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: bodryakova@gmail.com)*

ESEPENOK Konstantin Viktorovich, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of

“Technology and quality management of agricultural products named after S.A. Kaspariants”

*Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin
(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: kv@esepenok.ru)*

KONOVODOV Taras Alekseevich, master's student of the Department of

“Technology and Quality Management of Agricultural Products named after S.A. Kaspariants”

Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin

(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: tarkon9@yandex.ru)

Abstract. The article is devoted to solving the current problem of rational processing of animal products, in particular dairy products, to obtain food products that are not only balanced in nutritional and energy value, but also contribute to the health of the population. Dairy whey, formed as a by-product in the production of protein-fat products such as cottage cheese and cheese, due to its biological value is a valuable raw material resource that can enrich dairy products with nutrients necessary for a person to live an active life. The aim of the work is to propose a method of using dried curd whey as a secondary dairy raw material in the production of curd products. The objects of the study were samples of cheesecakes made of skimmed curd, which is prepared from a mixture of raw cow's and goat's milk in ratios 2:1 (sample 1) and 1:1 (sample 2). The objectives of the research included: the development of a recipe for cheesecakes using whey, modeling of the technological scheme of production, establishing compliance of quality and safety of the new product to regulatory documents. The research was conducted in accordance with current standards and approved methods using modern methods of organoleptic, physico-chemical and microbiological analysis of the properties of cottage cheese curds. The stated technological solution for the use of whey can become the basis of resource-saving technology of dairy products.

Keywords: secondary dairy raw materials, whey, recycling, curd products, recipe composition, cheesecakes, resource-saving technology.

Для цитирования: Бодрякова Н.П. Новые технологические решения использования вторичного молочного сырья в производстве творожных изделий / Н.П. Бодрякова, К.В. Есепенок, Т.А. Коноводов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 184-189. – EDN: EPTGHP.

Введение. Государственная программа развития сельского хозяйства России, согласно Постановлению Правительства РФ № 1573 от 30.11.2019, нацелена на обеспечение продовольственной безопасности, импортозамещение и увеличение конкурентоспособности отечественной сельхозпродукции. Инновации коснулись различных областей науки и практики: генетики, селекции, технологий производства, механизации и специализации пищевых производств [13]. Наращивание объемов производства продукции животноводства предопределяется необходимостью обеспечения продовольственной независимости России и наиболее полного удовлетворения потребительского спроса на качественные продукты. Пищевая промышленность акцентирует внимание на современных технологиях переработки и создании безопасной и качественной пищи, способствующей сохранению здоровья нации [5-7].

В России и за рубежом популяризируются продукты функционального назначения, а также обогащенные нутриентами, что улучшает рацион питания и снижает возможные риски заболеваний. Производство специализированной пищи стало важным направлением пищевой индустрии. В технологии пищевых производств важна и актуальна разработка способов минимизации отходов и побочных продуктов посредством рециклинга, например, в молочной промышленности используются сыворотка, пахта и обезжиренное молоко как вторичное сырьё [9, 12, 21].

Перспективным способом обогащения молочных продуктов является извлечение полезных компонентов из вторичного молочного сырья, включая переработку молочной сыворотки для получения ценных белков с высоким содержанием незаменимых аминокислот. Эти молочные белки легко перевариваются и помогают предотвратить

дисбаланс нутриентов в организме [2].

Состав молочной сыворотки обусловлен технологией вырабатываемого продукта. Творожная сыворотка, в отличие от подсырной, имеет более высокую кислотность, что влияет на особенности технологического процесса их переработки [23]. Сывороточный белок рассматривается как универсальный ингредиент для новых продуктов питания, обеспечивая эффективность при производстве сыров и кисломолочных продуктов [1]. Молочная сыворотка повышает биологическую ценность продуктов благодаря липотропным и антиоксидантным компонентам. Пища, обогащенная сывороткой, благотворно влияет на здоровье и предотвращает витаминную недостаточность [11, 15, 19].

По имеющимся аналитическим данным, общий объем рынка молочной сыворотки в Российской Федерации за период 2014-2020 гг. вырос на 35%. По мнению экспертов, тенденция роста продолжится, в 2023 году данный показатель – 10,28 млн. т. По данным Союзмолоко и ФГСС, с января по октябрь 2024 года производство сухой сыворотки выросло на 1% (до 186,1 тыс. т.) [3, 16, 17].

Интеграция в производственный процесс вторичных молочных ресурсов служит инновационными технологическими подходами, позволяющими расширить ассортимент пищевой продукции, повысить экономический эффект перерабатывающих производств, улучшить в целом экологическую обстановку путем снижения объемов отходов производства.

Молоко является основным сырьём для молочной продукции, такой как творог, который благодаря высоким пищевым ценностям и полезным свойствам обладает высоким спросом. Творог предпочтителен за счёт содержания белков и жира, а процесс брожения при производстве улучшает усвояемость казеина [4, 10, 20, 21].

Анализ научно-технической информации доказал, что сегмент рынка десертов на творожной основе в странах ЕС активно развивается. Для удовлетворения потребительского спроса на молочные десертные продукты необходимо расширить их ассортимент, производя отечественную конкурентноспособную молочную продукцию для общего и функционального питания, соответствующую мировым стандартам.

Как и для других продуктов питания, для творожных изделий весьма актуален поиск альтернативных сырьевых источников, которые позволят увеличить объемы производства, минимизировать технологические затраты с учетом медико-биологической оценки, качества и безопасности готовой продукции. Вторичное молочное сырьё, используемое в технологии творожных изделий, должно существенно восполнить минеральную часть готового продукта. С данной точки зрения, молочная сыворотка является универсальным сырьевым ресурсом для обогащения продуктов питания [18, 23, 25, 26].

Методология. Цель работы – предложить техническое решение использования сухой творожной сыворотки, как вторичного молочного сырья в производстве творожных изделий на примере сырников.

В задачи исследований входило: разработка рецептуры сырников с использованием молочной сыворотки, моделирование технологической схемы производства, установление соответствия качества и безопасности нового продукта нормативным документам.

Объектами исследования служили образцы сырников, выработанные из обезжиренного творога,

который приготовлен из смеси сырого коровьего и козьего молока в соотношениях 2:1 (образец 1) и 1:1 (образец 2). В качестве вспомогательного сырья в состав рецептуры входили: мука пшеничная в/с, яйца куриные, сахарный песок, соль поваренная пищевая и сыворотка молочная сухая. Контрольный образец изготовлен из творога на основе коровьего молока, без молочной сыворотки. Исследования творожных сырников проводились по действующим стандартам и методикам с применением органолептического, физико-химического и микробиологического анализа. Оценка качества проводилась в соответствии с ТУ 9222-001-62690663-2003. Исследованы физико-химические показатели (массовая доля влаги и сухого вещества, жира, белка, золы) по государственным стандартам: 3626-73, 5867-2023, 25179-2014, Р 51463-99. Оценка микробиологической безопасности продукта проведена методами: ГОСТ 32901-2014, 33951-2016, 33566-2015, 30347-2016; результаты сопоставлялись с требованиями ТР ТС 033/2013.

Результаты. Для разработки рецептурной композиции сырников были составлены два опытных варианта рецептур с различным соотношением основного сырья. За основу для новой рецептуры приняли технологическую карту ТТК 5646 [22], по которой получили контрольную партию сырников. По предварительным исследованиям по оптимизации количества вносимого вторичного молочного сырья установлено, что рецептура с использованием 4% молочной сыворотки оказалась лидером по потребительским предпочтениям [8].

Рецептурная композиция исследованных сырников творожных графически представлена на рисунке 1.

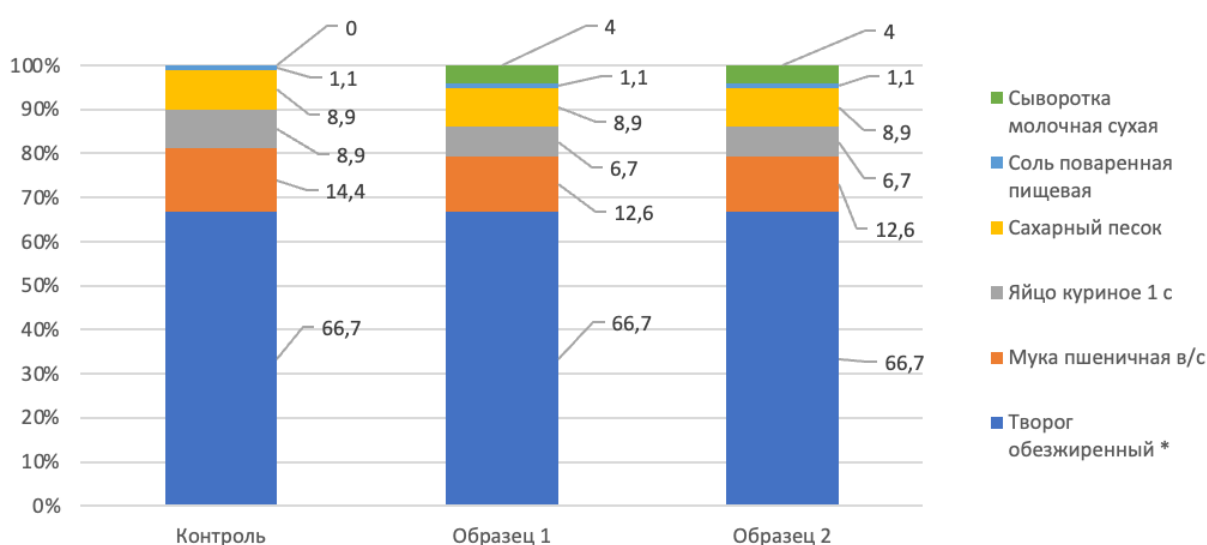


Рисунок 1 – Соотношение* рецептурных компонентов сырников творожных, масс.%
(* творог изготовлен: для контрольного образца – из коровьего молока;
для образца 1 – из коровьего и козьего молока в соотношении 2:1;
для образца 2 – из коровьего и козьего молока в соотношении – 1:1)

Технологическая схема была модифицирована следующим образом. Сырое коровье и козье молоко (2:1 и 1:1) подогрели до 45-50°C и смешивали. Далее проводили сепарирование, пастеризацию 45-50 мин при t 63-65°C, сквашивание. В подогретое до 38°C молоко вносили по 2,5% заквасочные культуры (мезофильный стрептококк и термофильный молочнокислый стрептококк), а также 1 г/л сычужного фермента пепсина. Сгустки разрезали лирами творогоизготовителя, после творог выдерживали в пресс-тележках для отделения сыворотки, охлаждали до $4 \pm 2^\circ\text{C}$. Отделившуюся творожную сыворотку отправляли на высушивание с применением мембранных технологий для дальнейшего рециклинга. Далее рецептурные компоненты загружали в фаршемешалку и перемешивали около 40 минут. Творожный замес переводили в дозатор, формировали сырники по 75 г.

Провели комплексную оценку качества готового продукта для подтверждения практической значимости предлагаемых рецептур. Методом органолептического анализа охлажденных сырников установили, что опытные образцы 1 и 2, по сравнению с контролем, имели округло-приплюснутую форму, без трещин и ломаных краев, цвет кремовый и светло-кремовый, соответственно. По консистенции образцы были однородные, умеренно плотные и упругие с приятным сладким вкусом, без посторонних привкусов и запахов. Таким образом, введение в рецептуру молочной сыворотки обеспечило улучшение структуры продукта.

Далее была осуществлена оценка вкусовых характеристик готового продукта: сырники запанировали в муке, обжарили, переворачивая, по 3 минуты, после провели по 5-балльной шкале потребительскую дегустационную оценку, в которой приняли участие 5 человек (рис. 2).

Опытные образцы сырников, по результатам оценки дегустаторов, имели близкие характеристики по баллам. Образец 2 набрал максимальное количество баллов по сравнению с другими образцами – 4,85. Результаты показывают, что использование творога из козьего и коровьего молока в соотношении 1:1, а также добавление сухой сыворотки в рецептуру улучшает органолептические показатели сырников. Это связывают с соотношением коровьего и козьего молока при производстве творога. Так как козье молоко обладает более высокой жирностью, то образец 2, где равное соотношение видов молочного сырья, выигрывает по органолептическим показателям, особенно по консистенции, по сравнению с образцом 1, где соотношение коровьего молока преобладает над козьим.

Непоследнее значение в обеспечении конкурентоспособности молочного продукта имеет нутриентный состав, представленный на рисунке 3.

Контрольная партия сырников, как указывалось ранее, выработана по типовой технологии (ТТК 5646), что поясняет большее количества белка. Опытные образцы сырников были изготовлены из обезжиренного творога с целью получения диетического продукта.

По данным физико-химических исследований (рис. 3) можно судить, что в опытных образцах 1 и 2 более высокое содержание углеводов – 29% и 27%, соответственно, что можно обосновать использованием молочной сыворотки. Массовая доля влаги и золы в образцах не превышает нормы, установленные нормативным документом. Стоит отметить, за счет использования обезжиренного творога удалось повысить диетичность сырников: образец 1 – 696,68 кДж / 166,68 ккал, образец 2 – 731,6 кДж / 174,74 ккал по сравнению с контролем – 1505,61 кДж / 359,85 ккал.

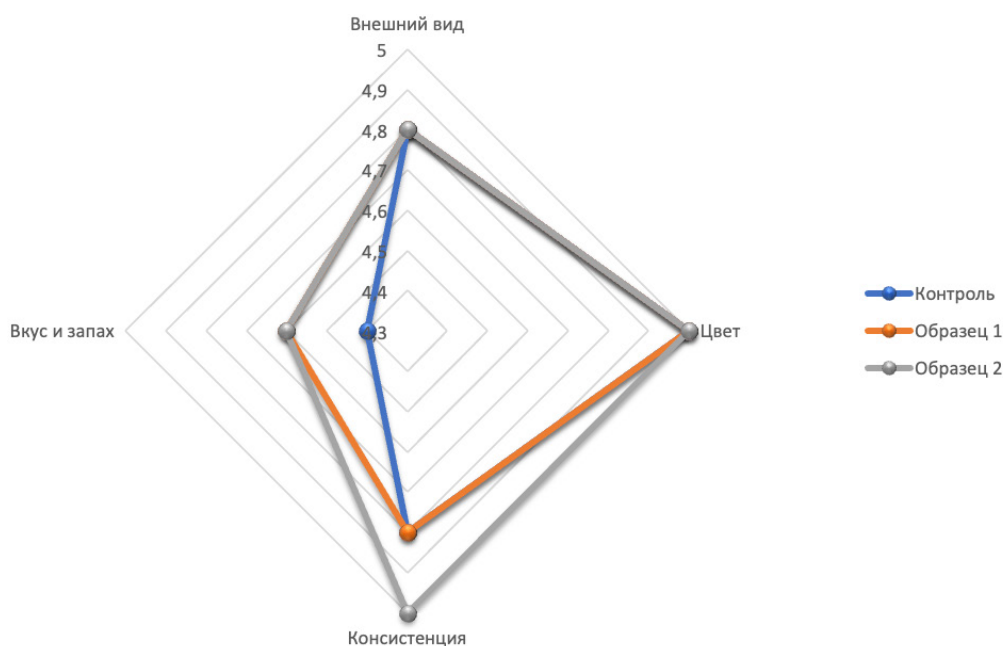


Рисунок 2 – Результаты потребительской дегустационной оценки

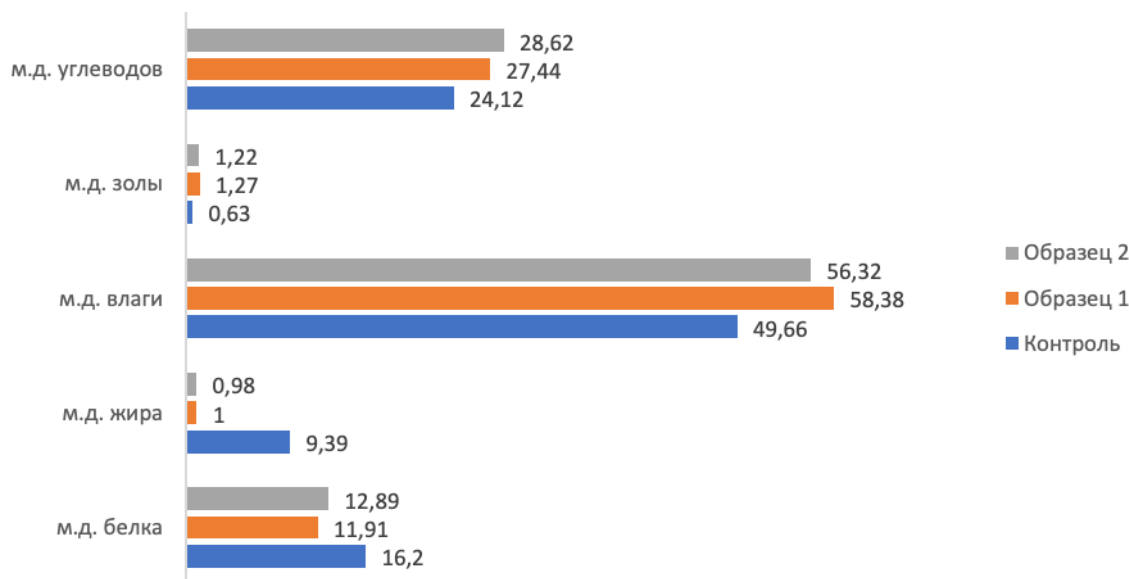


Рисунок 3 – Физико-химические показатели опытных образцов сырников творожных, %

Обязательной частью экспертизы продукта, получаемого с учетом новых технологических усовершенствований, является установление его безопасности. Результаты исследования микробиологических показателей безопасности творожных сырников представлены в таблице 1.

Микробиологический анализ показал соответ-

ствие исследуемых образцов требованиям ТР ТС 033/2013 по содержанию дрожжей, плесневых форм, условно-патогенной и патогенной микрофлоры. Количество микроорганизмов творожной закваски в контрольном, 1 и 2 образцах составило $1,8 \times 10^7$, $1,9 \times 10^7$, $2,0 \times 10^7$ КОЕ/г соответственно, что соответствует нормативным требованиям.

Таблица 1 – Оценка микробиологических показателей сырников творожных, выработанных с использованием вторичного молочного сырья

Наименование показателя, КОЕ/г	Требования ТР ТС 033/2013	Контроль	Образец 1	Образец 2
КМАФАнМ, не менее	1×10^6	$1,8 \times 10^7$	$1,9 \times 10^7$	$2,0 \times 10^7$
БГКП (колиформы), в 0,3 г	не допускается	не зафиксировано	не зафиксировано	не зафиксировано
E. coli, в 1 г	не допускается	не зафиксировано	не зафиксировано	не зафиксировано
Salmonella, в 50 г	не допускается	не зафиксировано	не зафиксировано	не зафиксировано
S. aureus, в 1 г	не допускается	не зафиксировано	не зафиксировано	не зафиксировано
Дрожжи, КОЕ/г	10	9	7	6
Плесени, КОЕ/г	10	не зафиксировано	не зафиксировано	не зафиксировано

Обсуждение. Творожные сырники соответствуют нормативно-технической документации по качеству и безопасности. Использование молочной сыворотки в производстве творожных изделий может быть экономически выгодно. Сырники по рецептуре 2 лидируют по дегустационной оценке, но обе рецептуры подходят для внедрения в производство. Выбор соотношения коровьего и козьего молока для творога зависит от предпочтений производителя и доступности сырья.

Выводы. По результатам исследований предложен принципиально новый способ использования молочной сыворотки: рекомендована рецептура сырников с использованием сухой молочной сыворотки в количестве 4,0%, получен патент на изобретение «Кулинарный продукт в виде творожных сырников» [14]. С нашей точки зрения, весьма экономически обоснованным станет технологическое решение, которое заключается в рециклинге тво-

рожной сыворотки после дополнительно проведенной сушки с использованием системы обратного осмоса. Данный технологический подход может стать основой ресурсосберегающей технологии творожных изделий, обуславливающей не только сбалансированность состава творожных изделий, но и эффективность производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Агаркова, Е.Ю. Особенности технологии молочных продуктов, обогащенных сывороточными белками / Е.Ю. Агаркова, А.Ю. Чиликин // Молочная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 49-51. – DOI 10.31515/1019-8946-2021-03-49-51.
2. Агаркова, Е.Ю. Современные технологические подходы к обогащению молочных продуктов / Е.Ю. Агаркова, А.Г. Кручинин, К.А. Рязанцева // Инновационные технологии обогащения молочной продукции (теория и практика). – Москва : Франтера, 2016. – С. 110-142.
3. Агаркова, Е.Ю. Состояние рынка продуктов для энтерального питания / Е.Ю. Агаркова, Н.Е. Шерстнева // Молочная промышленность. – 2024. – № 2. – С. 16-24. – DOI

10.21603/1019-8946-2024-2-1.

4. Алкадур, М.И. Влияние класса термической обработки сухого молока на структуру и свойства ферментированного сгустка / М.И. Алкадур, А.Н. Петров, Н.С. Пряничникова // Пищевая промышленность. – 2024. – № 11. – С. 82-89. – DOI 10.52653/PPI.2024.11.11.015.
5. Бодрякова, Н.П. Оценка качества и безопасности йогуртовой продукции, реализуемой в розничной сети / Н.П. Бодрякова, Е.А. Смирнова, Н.В. Пименов // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. – 2022. – № 12-2. – С. 99-106. – DOI 10.36871/vet.zoo.bio.202212214.
6. Василевич, Ф.И. Влияние кормовой добавки на основе белкового гидролизата на клинический статус телят / Ф.И. Василевич, В.М. Бачинская, А.А. Дельцов // Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. – 2020. – № 3(35). – С. 359-364. – DOI 10.36871/vet.san.hyg.ecol.202003011.
7. Дорошко, К.И. Актуальность расширения ассортимента йогуртовой продукции для здорового питания / К.И. Дорошко, Н.П. Бодрякова // Пищевая инженерия, экспертиза и безопасность продукции АПК: инновационные решения и перспективы развития: Сборник научных трудов IV национальной научно-практической конференции, Москва, 01 июня 2023 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА имени К.И. Скрябина», 2023. – С. 40-46.
8. Коноводов Т.А. Перспективы использования вторичного молочного сырья в производстве творожных изделий / Т.А. Коноводов, Н.П. Бодрякова // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии и биотехнологии. – Москва : ФГБОУ ВО МГАВМиБ - МВА имени К.И. Скрябина, 2021. – № 15. – С. 236-240.
9. Леденева, Е.Н. Актуальные аспекты производства молочных напитков функционального назначения / Е.Н. Леденева, Н.П. Бодрякова // Товароведение, технология и экспертиза: инновационные решения и перспективы развития: Материалы национальной научно-практической конференции, Москва, 14-15 июня 2018 года. – Москва: зооветкнига, 2018. – С. 63-68.
10. Луфаренко, О.Д. Технология производства глазированных сырков / О.Д. Луфаренко, Ю.А. Козуб // Colloquium-journal. – 2019. – № 2(26). – С. 44-47.
11. Мельникова, Е.И. Творожная сыворотка: опыт использования в технологии кисломолочных напитков / Е.И. Мельникова, Е.Б. Станиславская // Молочная промышленность. – 2021. – № 7. – С. 44-45. – DOI 10.31515/1019-8946-2021-07-44-45.
12. Николаев, И.А. Разработка продуктов функционального назначения для лечения и профилактики недостаточности микроэлементов / И.А. Николаев, С.Н. Гладких // Физиологические, психофизиологические проблемы здоровья и здорового образа жизни: материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 23-24 апреля 2020 года. – Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет, 2020. – С. 169-171.
13. Опыт применения белковых гидролизатов в молочном скотоводстве / Ф.И. Василевич, В.М. Бачинская, А.А. Дельцов, Д.В. Гончар // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. – 2024. – № 1. – С. 76-82. – DOI 10.36871/vet.zoo.bio.202401009.
14. Патент № 2809229 С1 Российская Федерация, МПК A23C 23/00, A21D 13/80. Кулинарный продукт в виде творожных сырников: № 2022133004: заявл. 15.12.2022: опубл. 07.12.2023 / Н.П. Бодрякова, К.В. Есепенек, М.В. Горбачева, Т.А. Коноводов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московская государственная академия ветеринарной медицины биотехнологии МВА имени К.И. Скрябина".
15. Семенова А.А. Пищевая и биологическая ценность молочной сыворотки // Актуальные исследования. – 2023. – №1(131). – С. 10-12. URL: <https://apni.ru/article/5312-pishchevaaya-i-biologicheskaya-tsennost-moloch> (дата обращения: 19.12.2024).
16. Современное состояние производства молочной сыворотки в России и перспективы дальнейшего развития / А.С. Венецианский, Д.А. Хохрина, В.М. Напалкова [и др.] // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2023. – № 2(79). – С. 93-98. – DOI 10.33979/2219-8466-2023-79-2-93-98.
17. Современное состояние рынка вторичных сырьевых ресурсов молочной промышленности / А.Г. Кручинин [и др.]. // Ползуновский вестник. – 2022. – № 4. – Т. 1. – С. 140-148. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.04.018.
18. Туганова Б.С. Технология производства пастообразного замороженного десертного продукта из вторичного молочного сырья // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2022. 1(35). – С. 121-127. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-121-127.
19. Централизованная переработка сыворотки / В.А. Лазарев, Р.Т. Тимакова, С.Л. Тихонов, А.В. Акулич // Молочная промышленность. – 2021. – № 10. – С. 30-32. – DOI 10.31515/1019-8946-2021-10-30-32.
20. Чебакова, Г.В. Производство детского творожка на основе коровьего и козьего молока с наполнителями / Г.В. Чебакова, К.В. Есепенек // Пищевая промышленность. – 2021. – № 10. – С. 26-29. – DOI 10.52653/PPI.2021.10.10.003.
21. Шагаева, Н.Н. Исследование потребительских предпочтений напитков на основе молочной сыворотки / Н.Н. Шагаева, В.П. Зосимова, И.А. Зачесова // Товароведение, технология и экспертиза: инновационные решения и перспективы развития: Материалы III национальной научно-практической конференции, Москва, 02 июня 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА имени К.И. Скрябина», 2022. – С. 235-238.
22. Сырники из творога (ТТК 5646). – Текст : электронный. - URL: <https://tekhnolog.com/2019/05/20/syrniki-iz-tvoroga-ttk5646>.
23. Milk Bioactive Compounds and Gut Microbiota Modulation: The Role of Whey Proteins and Milk Oligosaccharides / V. Gallo, A. Arienzo, F. Tomassetti, G. Antonini // Foods. – 2024. – Vol. 13, No. 6. – P. 907. – DOI 10.3390/foods13060907.
24. Directional proteolysis of secondary raw materials / N.A. Zolotarev, O.B. Fedotova, E.Yu. Agarkova [et al.] // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия химии и технологии. – 2020. – No. 5. – P. 77-84. – DOI 10.32014/2020.2518-1491.83.
25. Physicochemical and Sensory Characterization of Whey Protein-Enriched Semihard Cheese / T. Von Oesen, K. Schrader, I. Clawin-Rädecker [et al.] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2024. – Vol. 72, No. 11. – P. 5898-5911. – DOI 10.1021/acs.jafc.3c08731.
26. Sensory method for the analysis of milk dessert from curd whey / L.F. Ponomareva, N.V. Burakovskaya, Ya.M. Rebezov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 18–20 ноября 2020 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall. Vol. 677. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 32042. – DOI 10.1088/1755-1315/677/3/032042.

Статья поступила в редакцию 23.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 631.589

EDN: ECEZGN

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СУБСТРАТОВ В АКВАПОНИЧЕСКОЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ

© Авторы 2025

SPIN: 3116-8958

Author ID: 153213

ORCID: 0000-0002-8703-3002

Scopus ID: 58042518300

КАЛАЙДА Марина Львовна, доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Водные биоресурсы и аквакультура»
Казанский государственный энергетический университет
(420066, Россия, Казань, улица Красносельская, 51, e-mail: kalayda4@mail.ru)

SPIN: 7836-1692

Author ID: 783130

ORCID: 0000-0002-5415-6663

Scopus ID: 57210315381

БОРИСОВА Светлана Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура»
Казанский государственный энергетический университет
(420066, Россия, Казань, улица Красносельская, 51, e-mail: svetlana-zag@bk.ru)

Аннотация. Аквaponика – это инновационная система, интегрирующая аквакультуру (разведение рыбы) и гидропонику (выращивание растений без почвы). Цель работы – исследование применения различных субстратов в аквaponике. Задачи исследования: провести экспериментальное исследование выращивания салата листового и базилика в аквaponической установке на различных типах субстратов. Эксперименты по выращиванию салата и базилика на различных экспериментальных субстратах проводились в демонстрационной установке кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» Казанского государственного энергетического университета. Результаты экспериментов по проращиванию листового салата и семян базилика показали, что самая высокая выживаемость базилика и салата отмечена на гальке и керамзите, чуть меньше – на мхе и кокосовом субстрате. На таких субстратах как поролон, гидрогель, перлит и минеральная вата побеги базилика и салата погибали. Таким образом, наиболее перспективными субстратами для выращивания ценных видов растений в аквaponике являются керамзит фракцией 5-7 мм и мелкая галька. Оба субстрата способны удерживать большое количество влаги, имеют хорошие аэрационные и дренажные свойства, не деформируются в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: аквaponика, аквакультура, инновационная система, ресурсосбережение, субстраты, выращивание растений, скорости роста, оценка субстратов, всхожесть семян, интегральная оценка.

INVESTIGATION OF SUBSTRATES APPLICATION IN AQUAPONIC RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY

© The Author(s) 2025

KALAYDA Marina Lvovna, doctor of biological sciences, professor,
head of the department of aquatic biological resources and aquaculture
Kazan State Energy University

(420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya Street, 51, e-mail: kalayda4@mail.ru)

BORISOVA Svetlana Dmitrievna, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor, department of aquatic bioresources and aquaculture
Kazan State Energy University

(420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya Street, 51, e-mail: svetlana-zag@bk.ru)

Abstract. Aquaponics is an innovative system that integrates aquaculture (fish farming) and hydroponics (growing plants without soil). The purpose of the work is to study the use of various substrates in aquaponics. Research objectives: to conduct an experimental study of growing leaf lettuce and basil in an aquaponic installation on various types of substrates. Experiments on growing lettuce and basil on various experimental substrates were carried out in the demonstration unit of the Department of Aquatic Biological Resources and Aquaculture of Kazan State Energy University. The results of experiments on the germination of leaf lettuce and basil seeds showed that the highest survival rate of basil and lettuce was noted on pebbles and expanded clay, slightly less on moss and coconut substrate. On substrates such as foam, hydrogel, perlite and mineral wool, basil and lettuce shoots died. Thus, the most promising substrates for growing valuable plant species in aquaponics are expanded clay with a fraction of 5-7 mm and small pebbles. Both substrates are capable of retaining a large amount of moisture, have good aeration and drainage properties, and do not deform during operation.

Keywords: aquaponics, aquaculture, innovation system, resource saving, substrates, growing plants, growth rates, substrate assessment, seed germination, integral assessment.

Для цитирования: Калайда М.Л. Исследование особенностей применения субстратов в аквапонической ресурсосберегающей технологии / М.Л. Калайда, С.Д. Борисова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 190-196. – EDN: ECEZGN.

Введение. Основной целью развития аквакультуры в настоящее время является увеличение глобального производства водных пищевых продуктов [1]. В прогнозах ученых наблюдается следующая тенденция: к 2030 году доля рыбопродуктов в общем потреблении рыбы составит 89%. Это связано с высоким спросом, вызванным ростом доходов, урбанизацией и увеличением производства рыбы на промышленных фермах, в то время как вылов в естественных экосистемах снижается. Также наблюдается рост интереса к здоровому питанию, что дополнительно увеличивает спрос на рыбу. Ожидается, что к 2030 году мировое потребление рыбы достигнет 28 миллионов тонн в живом весе, что на 18% больше по сравнению с уровнем 2018 года [1, 2].

Дальнейшее развитие аквакультуры – интегрированные технологии, где конечным продуктом является не только рыба, но и другие объекты сельского хозяйства – водоплавающая птица или ценные виды растений. Применение таких технологий позволяет фермерам повысить экономическую эффективность хозяйств. Кроме того, многократное использование воды в установках замкнутого цикла позволяет использовать продукты жизнедеятельности рыб, как источник питательных веществ, для растительных объектов выращивания [3-6].

Выращивание зелёных, овощных и декоративных культур на различных субстратах в циркуляционных водах установок без использования почвы представляет собой аквапоническую технологию, которая в последнее время приобрела популярность как в России, так и за рубежом [7-10]. Основой данной технологии является совместное выращивание аквакультурных объектов и ценных сортов растений, которые в процессе своего роста используют отходы жизнедеятельности рыб, такие как азотсодержащие, калийные и фосфорные соединения, а также углекислый газ, растворенный в воде. Растения используются в качестве биофильтра, когда корневая система выполняет функцию механической очистки, а усвоение растениями азотистых метаболитов рыб заменяет элементы классическим биологическим фильтрам [11]. Отсутствует и необходимость удобрять растения, как это делается в гидропонике, что делает эту технологию более экологичной.

Преимуществами аквапоники как ресурсосберегающей технологии являются:

– экономия воды – в аквапонических системах используется до 90% меньше воды по сравнению с традиционным земледелием, это возможно бла-

годаря повторному использованию воды и минимизации испарений;

– эффективное использование пространства – аквапоника позволяет максимально использовать вертикальное пространство, обеспечивая высокую плотность растений и позволяя использовать меньшие площади для достижения большего урожая;

– отсутствует необходимость в удобрениях – растения получают питательные вещества из отходов рыбы, это снижает затраты и уменьшает воздействие на окружающую среду;

– устойчивость к засухе – в условиях нехватки воды аквапонические системы остаются эффективными благодаря переиспользованию воды, что делает их более устойчивыми к изменениям климата;

– устойчивость с позиции экосистемы – аквапонические системы способствуют биомассовому разнообразию и обеспечивают более устойчивые производственные циклы с меньшим воздействием на экосистемы;

– высокое качество продуктов – растения, выращенные в аквапонических системах, часто содержат более высокие концентрации питательных веществ и являются даже более вкусными, что привлекает потребителей, заинтересованных в здоровом питании.

В настоящее время наблюдается увеличением численности населения планеты. По прогнозам ученых, к концу этого века количество людей на Земле увеличится до 10-11 миллиардов человек. Параллельно и научно – технический прогресс не стоит на месте. Агротехнологии развиваются и расширяется ассортимент ценных культур на фоне ресурсосбережения и экологичности. Подобная тенденция наблюдается и в развитии аквапонических систем. Аквапоническое выращивание растений на основе отходов жизнедеятельности рыб – это эффективный метод очистки воды в рыбоводстве без химических веществ и синтетических компонентов.

Выращивание ценных растений в аквапонике невозможно без использования грунтов – субстратов. Выбор субстрата – это элемент оптимизации и повышения эффективности работы аквапонических систем. На рынке представлены различные их варианты: щебень, керамзит, вермикулит, перлит, шлак, минеральная вата, опилки, торф и мох. Также можно использовать синтетические материалы, но не все они подходят для использования в аквапонических системах [12-19]. Несмотря на хорошие физические характеристики, гидропоника и аквапоника имеют слишком высокую химическую активность. Кроме того, субстраты могут содержать

семена сорняков, возбудителей заболеваний и вредителей [12].

Субстрат должен соответствовать следующим требованиям: он не должен содержать токсичных веществ, быть химически нейтральным или инертным по отношению к питательному раствору; обеспечивать возможность поддержания определенного уровня воды и хорошую аэрацию; быть достаточно прочным, чтобы растения оставались в вертикальном положении на протяжении всего их жизненного цикла; обладать высокой водопроницаемостью и воздухопроницаемостью, а также достаточной влагоемкостью [12-19]. С течением времени химические и физические свойства любого аквапониического субстрата могут изменяться, что может негативно сказаться на процессе выращивания растений. Поэтому субстрат следует периодически заменять или регулярно обслуживать.

Методология. Эксперименты по выращиванию салата и базилика на различных экспериментальных субстратах проводились в демонстрационной запатентованной аквапониической установке кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» ФГБОУ ВО «КГЭУ». Время эксперимента: 30 дней для салата и 60 дней для базилика [15]. В лаборатории кафедры поддерживались постоянная температура воздуха 24°C и влажность 83%, освещение производилось фитолампами *Uniel LED-T8-18W/SPSB/G13/CL PLP30WH* для растений *UL-00006698* (страна производитель Китай) мощностью 110 Ватт в течение 12 часов в сутки [20].

В ходе исследования использовались следующие виды субстратов: поролон, перлит, галька, минеральная вата, гидрогель, кокосовое волокно, мох сфагнум и керамзит от фирмы «Долина плодородия» (страна производитель – Россия) с размером фракции 5-7 мм. В экспериментах использовался базилик овощной (сорт «Василиск») и салат (сорт «Гейзер») от компании «Гавриш» (страна производитель – Россия). Выращивание овощных растений проводилось в стандартных емкостях объемом 0,6 л, которые заполнялись на 2/3 субстратом, в каждую емкость помещалось по 50 штук семян. Проводился анализ трех этапов развития салата и базилика: прорастания семян (всхожесть семян, %), выживания молодых побегов (выживаемость, %), рост биомассы растений (масса, г). Выращивание базилика осуществлялось на воде, поступающей в аквапониическую установку из бассейнов, где выращивались караси обыкновенные (*Carassius carassius L.*) массой 100-150 г. Их плотность посадки составил 20 кг/м³. В лотки с салатом поступала вода из рыбоводных бассейнов с клариевыми сомами в (*Clarias gariepinus*) массой 700-800 г. Их плотность посадки составляла 30 кг/м³. В ходе работы был проведен анализ результатов собственных исследований, а также литературных данных.

Результаты. В эксперименте по проращиванию

семян листового салата и базилика использовались следующие субстраты: поролон, перлит, галька, минеральная вата, гидрогель, кокосовое волокно, мох сфагнум и керамзит. У каждого субстрата есть свои достоинства и недостатки:

– минеральная вата – это искусственный субстрат, это волокнистый материал, который получают из расплавов горных пород, а также металлургических шлаков и их смесей. Минеральная вата широко используется в гидропонике и аквапонике благодаря своим уникальным свойствам: аэрация, водопроницаемость, легкость, устойчивость к гниению;

– керамзит – это легкий строительный и садоводческий материал, получаемый путем обжига глиняных гранул при высоких температурах. В результате этого процесса образуются пористые, легкие и прочные гранулы, которые обладают рядом уникальных свойств, что делает керамзит популярным в различных областях, включая аквапонику и гидропонику;

– перлит – это природный вулканический стеклянный минерал, который при нагревании до высоких температур (около 800-1000°C) расширяется и превращается в легкий, пористый и инертный материал. Полученный перлит имеет белый или светло-серый цвет и обладает уникальными физическими свойствами схожими со свойствами минеральной ваты;

– вермикулит – это природный минерал, относящийся к группе слюд, пористый и инертный, имеет низкие показатели аэрации и дренажа [5, 9].

В результате выращивания салат и базилика на различных грунтах было отмечено, что семена салата проросли на 3 день эксперимента, семена базилика – на 5 день. Как видно из данных рисунка 1, на керамзите и гальке наблюдалась хорошая всхожесть всех семян – 83-91%. На мхе всхожесть составила 50% у семян салата и 59% у семян базилика; на коксовом субстрате – 38% у семян салата и 32% у семян базилика.

На субстратах – гидрогель, перлит и минеральная вата отмечена низкая всхожесть семян салата и базилика: от 10 до 15%. Это связано с такими характеристиками субстрата как гладкая поверхность гидрогеля (семена скатывались на дно емкости), легкость (по массе) перлита (грунта всплывал, семена опускались на дно) и плотной структурой минеральной ваты (из-за медленного тока воды семена оказались полностью в воде и загнивали на этапе прорастания).

Как видно из данных рисунка 2, выживаемость побегов салата на керамзите составила 70%, на гальке – 80%, на мхе и кокосовом субстрате – 5-10%. На таких субстратах как поролон, гидрогель, перлит и минеральная вата ростки салата погибли на 9-12 сутки эксперимента. Гибель ростков связана со структурой субстратных материалов: поролон имеет плотную структуру, что не позволяло корням растений развиваться и прорасти в субстрат;

гидрогель и перлит не смогли обеспечить опору растениям, которые оказались в воде и были поражены гнилостными бактериями. Выживаемость побегов базилика на керамзите составила 70%, на гальке – 75%, на мхе и кокосовом субстрате – 10%. На таких субстратах как поролон, гидрогель, перлит и минеральная вата ростки базилика погибли на 20-25 сутки эксперимента. Гибель ростков базилика так же была обусловлена особенностями структуры субстратов (рис. 3).

На рисунке 4 представлено изменение массы базилика (слева) и салата (справа) (в граммах) при экспериментальном выращивании в аквапонике. Анализ зависимостей показывает, что в зимний

период на метаболитах рыб хорошо растут пряные овощные культуры – салат и базилик. За 60 суток эксперимента базилик на керамзите вырос до массы 18 г. Скорость роста можно описать уравнением:

$$y = 0,6333x^2 - 2,321x + 2,4086, R^2 = 0,9812.$$

На гальке масса базилика в конце эксперимента составила 21 г, скорость роста описывается уравнением: $y = 0,1333x^2 + 2,1076x - 1,52R^2 = 0,9748$. За 30 суток эксперимента листовой салат вырос на керамзите до массы 15 г. Скорость роста можно описать уравнением $y = 1,7927x - 4,536R^2 = 0,9094$. На гальке масса салата к концу эксперимента была 18 г, скорость роста описывается следующим уравнением: $y = 0,1192x^2 + 1,047x - 2,7413R^2 = 0,9462$.

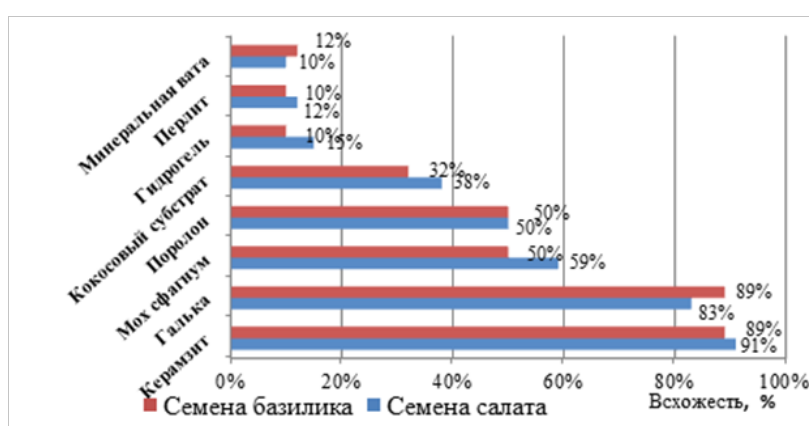
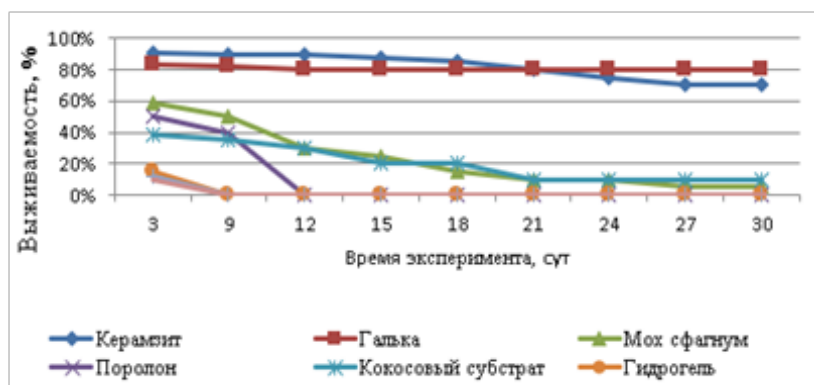
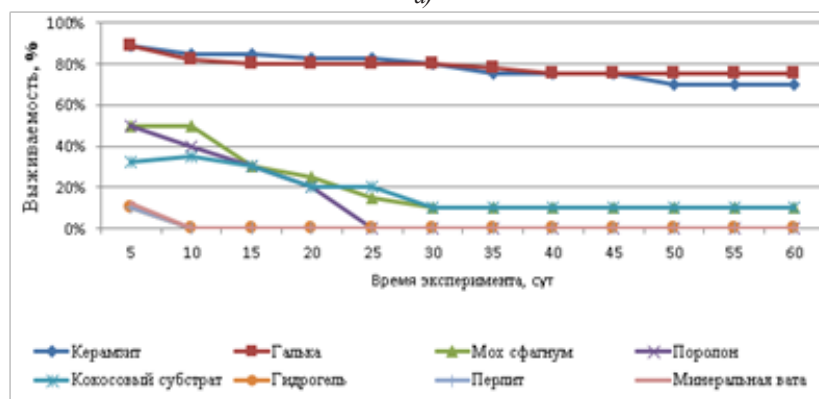


Рисунок 1 – Всхожесть семян салата и базилика



а)



б)

Рисунок 2 – Выживаемость ростков салата (а) и базилика (б) (в %) на разных типах субстратов

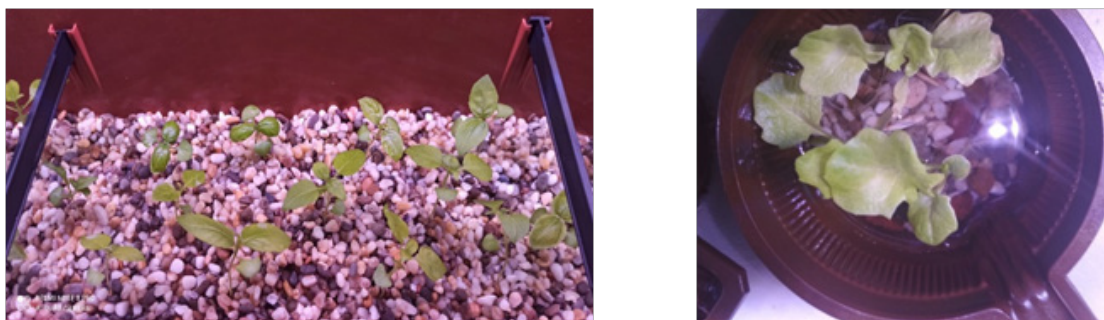


Рисунок 3 – Выращивание базилика (слева) и салата (справа) в аквапониической установке

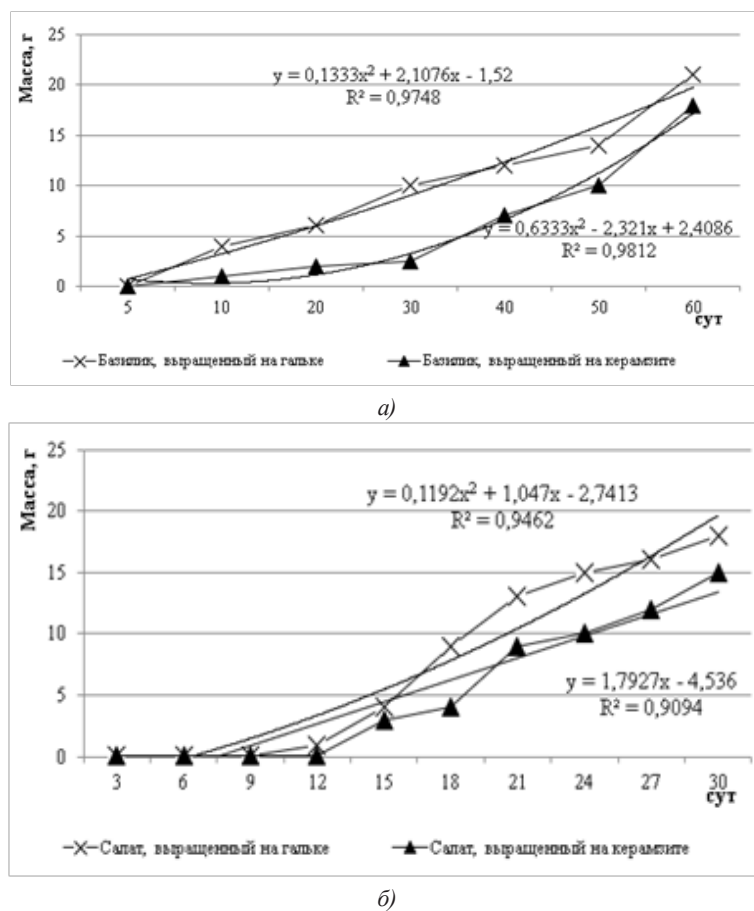


Рисунок 4 – Изменение массы базилика (слева) и салата (справа) (в граммах) при экспериментальном выращивании в аквапонике

Обсуждение. Проведенные эксперименты по выращиванию семян салата и базилика на различных субстратах показали, что керамзит и галька наиболее эффективные и удобные грунты для их выращивания. Керамзит позволяет обеспечить хорошую аэрацию корням растений, он химически нейтрален, может удерживать влагу, т.е. подходит для влаголюбивых культур и он химически нейтрален, что очень важно, учитывая, что вода циркулирует в системе рыба – аквапоника. Керамзит долговечен, не гниет и не разлагается

Галька пропускает воду, что позволяет воде свободно проходить через субстрат и предотвращает застой влаги. Она обеспечивает хорошую вентиляцию корней и поддерживает растения

вертикально. Мелкая галька также не подвержена деформации, что делает ее надежным выбором для долгосрочного использования в аквапониических системах.

Керамзит и галька использовались для дальнейшего выращивания растений в аквапонике.

На основании полученных экспериментальных данных была проведена интегральная экспертная оценка субстратов в аквапонике, результаты которой представлены в таблице 1. Интегральная оценка субстратов в аквапонике показала, что наибольшая всхожесть семян и выживаемость побегов отмечается в гальке и керамзите, при этом ни семена, ни ростки не поражались гнилостными заболеваниями. Поролон и мох сфагнум в качестве

субстрата использовать возможно только на этапе проращивания семян, затем необходима пересадка растений в другой грунт. Кокосовое волокно и минеральная вата оказались не эффективными для использования в аквапонической установке. Гидрогель и перлит также не эффективны в качестве субстратов в аквапонике, поскольку при небольшой всхожести семян, отмечался низкий процент выживаемости ростков и высокая поражаемость гнилостными заболеваниями как семян, так и ростков.

рогель и перлит также не эффективны в качестве субстратов в аквапонике, поскольку при небольшой всхожести семян, отмечался низкий процент выживаемости ростков и высокая поражаемость гнилостными заболеваниями как семян, так и ростков.

Таблица 1 – Интегральная экспертная оценка субстратов в аквапонике при выращивании базилика и салата

	Всхожесть семян в начале эксперимента, %	Выживаемость растений в конце эксперимента, %	Подверженность гниению, %
Керамзит	89-91	70	0
Галька	83-89	75-80	0
Мох сфагнум	50-59	5-10	20-30
Поролон	50	0	10-20
Кокосовое волокно	32-38	10	10
Гидрогель	10-15	0	100
Перлит	10-12	0	100
Минеральная вата	10-12	0	10

Выводы. Таким образом, использование аквапонических систем как на рыбоводных фермах, заводах, так и в квартирах, домах – это эффективное решение в условиях небольших пространств, экономии ресурсов и стратегии продовольственной безопасности страны. Аквапоническое выращивание растений – это круглогодичное обеспечение населения и отдельной семьи свежей, экологически чистой продукцией. Циркулярные технологии обеспечивают получение безопасных для здоровья продуктов без использования химических удобрений и синтетических добавок. Аквапоническая технология – безотходна. Рыбные отходы кормят растения, а остатки растений могут использоваться как корм для животных или в компостировании.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что используемый субстрат в аквапонике во многом определяет результат выращивания. Самая высокая выживаемость салата и базилика отмечена на гальке и керамзите – 75-80%. Эти субстраты могут быть рекомендованы для использования в аквапонических системах, что позволит повысить эффективность и продуктивность сельскохозяйственного производства. На мхе и кокосовом субстрате выживаемость составила 10%. На таких субстратах как поролон, гидрогель, перлит и минеральная вата побеги базилика погибали к 20-25 суткам эксперимента.

Интегральная оценка субстратов в аквапонике при экспериментальном выращивании базилика и салата показала, что наибольшая всхожесть семян и выживаемость побегов отмечается на гальке и керамзите, при этом ни семена, ни ростки не были подвержены гнилостным процессам. Поролон и мох сфагнум в качестве субстрата использовать возможно только на этапе проращивания семян. Кокосовое волокно и минеральную вату не целесообразно использовать в аквапонической установке для выращивания листового салата и базилика. Гидрогель и перлит также не рекомендуется ис-

пользовать в качестве субстратов в аквапонике, т.к. при небольшой всхожести семян, отмечен низкий процент выживаемости растений и их высокая подверженность гнилостным процессам.

Таким образом, керамзит фракцией 5-7 мм и мелкая галька представляют собой наиболее перспективные субстраты для аквапонического выращивания ценных видов растений. Их способность удерживать влагу, отличные аэрационные и дренажные свойства, а также устойчивость к деформации делают их идеальными для создания эффективных и продуктивных аквапонических систем. Использование этих субстратов может значительно повысить урожайность и качество выращиваемых культур, что делает их незаменимыми в современном агрономическом производстве

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры: достижение целей устойчивого развития 2022 / Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. – URL: <https://www.fao.org/documents/card/rw/c/CC0461RU> (дата обращения: 20.02.2024).
2. Балашов, В.В. О потреблении рыбной продукции населением России / В.В. Балашов, И.В. Волвенко, В.К. Зиланов, А.В. Фомин, Н.В. Яновская // Рыбное хозяйство. – 2023. – №6. – С.65-75. DOI: 10.37663/0131-6184-2023-6-65-75.
3. Голубев, А.В. Аквакультура в зеркале публикации активности / А.В. Голубев, А.В. Жигин // Рыбное хозяйство. – 2021. – №2. – С.64-67. DOI: 10.37663/0131-6184-2021-2-64-67.
4. Лапин, А.А. Биохимическое исследование листового салата, выращенного в условиях аквапонии / А.А. Лапин, С.Д. Борисова, М.Л. Калайда // Бултеровские сообщения. – 2019. – Т.59, №8. – С.132-139.
5. Калайда, М.Л. Элементы циркулярных технологий в аквакультуре / М.Л. Калайда, М.Ф. Хамитова, А.А. Калайда, С.Д. Борисова, В.В. Бабинова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2021. – №2. – С.76-89. DOI: 10.24143/2073-5529-2021-2-76-89.
6. Neerudu H. Supplementation of potassium in aquaculture wastewater and its effect on growth performance of basil (*Ocimum basilicum* L) and pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*) in NFT-based aquaponics / Neerudu Harika, Ajit Kumar Verma, Kishore Kumar Krishnani, Chandrakant Mallikarjun Hittinahalli, Ramakrishna Reddy, Manjulesh Pai // Scientia Horticul-

turae. – Volume 323. – 2024. – 112521, ISSN 0304-4238. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112521.

7. Kalaida, M. Elements of circular technologies in aquaculture on the waters of energy facilities / Madina Khamitova, Andrey Kalaida, Svetlana Borisova, Valeria Babikova // E3S Web of Conferences 288. – 01048 (2021). – SUSE-2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801048.

8. Калайда, М.Л. Использование аквапоники в эксплуатации малой рыболовной установки с замкнутым циклом водообеспечения / М.Л. Калайда, С.Д. Борисова // Современное состояние и развитие аквакультуры: экологическое и ихтиопатологическое состояние водоемов и объектов разведения, технологии выращивания: материалы международной конференции. – М.: ПКП, 2020. – С. 94-98.

9. Hribhu, C. Influencing factors for the plant growth patterns in hydroponic and aquaponic environments: A subgroup analysis for sustainable agricultural production / Hribhu Chowdhury, Bahram Asiabanpour // Green Technologies and Sustainability. – Volume 2, Issue 2. – 2024, 100084, ISSN 2949-7361, DOI: 10.1016/j.grets.2024.100084.

10. Siswanto, B. A simple dataset of water quality on aquaponic fish ponds based on an internet of things measurement device / Siswanto Bobby, Yasi Dani, Doni Morika, Bubun Mardiyana // Data in Brief. – Volume 48. – 2023, 109248, ISSN 2352-3409, DOI: 10.1016/j.dib.2023.109248.

11. Verma, K. Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects / Ajit Kumar Verma, M.H. Chandrakant, Venisza Cathy John, Roshan Maria Peter, Irene Elizabeth John // Technological Forecasting and Social Change. – Volume 194. – 2023, 122709, ISSN 0040-1625, DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122709.

12. Терещенко, С.А. Оценка сортов и подбор субстратов для получения качественной микрозелени индау посевного (*Eruca sativa* L.) / С.А. Терещенко, А.С. Пухальская // VIII Междуна. Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы: в 6 т. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – Т. 1. Инновации в науке, образовании и предпринимательстве. – 2020. – С. 152-156.

13. Babatunde, T. Response of germination and seedling growth of Jute plant (*Cochorus olitorius* L.) on three different substrates in the tilapia aquaponic system / Taofik Ademola Babatunde, Babangida Abdulkarim, Nasir Hassan Wagini, Sama'ila Adamu Usman, Lawali Alkali Argungu, Umar Lawal // Journal of Agriculture and Food Research. – Volume 10. – 2022, 100366, ISSN 2666-1543, DOI: 10.1016/j.jafr.2022.100366.

14. Abdul, H. Physical filtration of nutrients utilizing gravel-based and lightweight expanded clay aggregate (LECA) as growing media in aquaponic recirculation system (ARS) / Siti Hajar Abdul Hamid, Fathurrahman Lananan, Noordin Asimi Mohd Noor, Azizah Endut // Aquacultural Engineering. – Volume 98. – 2022, 102261, ISSN 0144-8609, DOI: 10.1016/j.aquaeng.2022.102261.

15. Кибякова, В.П. Аквапоника как устойчивая система выращивания комнатного растения *Spathiphyllum* / В.П. Кибякова, С.Д. Борисова // Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалам Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Казань, 24-26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 732-735.

16. Сеитов, С.К. К вопросу об искусственном разведении осетровых на Волге на основе аквапоники / С.К. Сеитов // ЭКО. – 2024. – № 3(597). – С. 158-183.

17. Перспективы выращивания осетра в установке малой мощности с применением технологии аквапоники / М.Ю. Руднев, А.А. Васильев, О.Н. Руднева, О.А. Гуркина // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 9. – С. 72-75.

18. Трофимов, Р.В. Аквапоника как метод ведения хозяйства / Р.В. Трофимов // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке: Материалы XXVI Международной научно-производственной конференции, Майский, 25 мая 2022 года. Том 1. – Белгород: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2022. – С. 238-239.

19. Медведева А.С. Исследование выращивания алоэ (*Aloe arborescens* mill.) в аквапонике / А.С. Медведева, С.Д. Борисова // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский

научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ: материалы докладов, Казань, 05-06 декабря 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 431-434.

20. Патент на полезную модель № 215077 Российская Федерация, Устройство для выращивания рыбы, раков, растений: опубл. 28.11.2022 / Калайда М.Л., Хамитова М.Ф., Борисова С.Д., Пиганов Е.С., Исмагилов Ф.А., Калайда А.А.; заявитель КГЭУ – 6 с.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 614.84

EDN: IMPFAI

**СНИЖЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ ПУТЕМ
ПОВЫШЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ НЕФТЯНЫХ ПРОБООТБОРНИКОВ**

© Авторы 2025

SPIN: 5350-3579

AuthorID: 689956

ORCID: 0000-0002-8325-1598

ScopusID: 57204675457

БОГДАНОВ Андрей Владимирович, доктор технических наук,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: bav-64@mail.ru)**ЕГОРОВ Максим Александрович**, магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности»*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: egorovmaxim2001@icloud.com)

SPIN: 2833-9435

AuthorID: 1041813

ПОЛУНИН Георгий Александрович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»*Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: poluninga@mail.ru)

Аннотация. В Российской Федерации количество пожаров остается на высоком уровне. Аналогичная ситуация в нефтяной промышленности. Причем распространены пожары, возникающие при отборе проб. Пожароопасные ситуации могут быть связаны и с утечками нефти и газа при нарушении герметичности устьевого оборудования. Износ резиновых прокладок нефтяного пробоотборника – распространённая проблема, связанная с химическим и механическим воздействиями на прокладки. Использование низкокачественных или неподходящих материалов также ускоряет процесс износа. Поэтому авторами статьи были проведены исследования с целью решения данной проблемы путем замены обычной резиновой прокладки на прокладки из альтернативных материалов. Экспериментальные исследования проводились с прокладками из каучука, фторкаучука и бутадиен-нитрильного каучука, на которые оказывались механические и химические воздействия. Лучшее себя показал образец из бутадиен-нитрильного каучука, который сохранил свои первоначальные геометрические параметры. Поэтому переход на прокладки из бутадиен-нитрильного каучука может решить проблему с утечками нефти и газа через нефтяные пробоотборники. Это позволит сократить риски возникновения возгораний и, как следствие, избежать больших финансовых потерь от пожаров и экологических катастроф.

Ключевые слова: износ, резиновая прокладка, утечки, каучук, пожар, нефтяные пробоотборники, нефтяное оборудование.

REDUCING THE PROBABILITY OF FIRES BY IMPROVING THE TIGHTNESS OF OIL SAMPLERS

© The Author(s) 2025

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)

EGOROV Maxim Aleksandrovich, master's student of the Department of Life Safety*South Ural State University (National Research University)*

(76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia, e-mail: egorovmaxim2001@icloud.com)

POLUNIN Georgy Alexandrovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Life Safety*South Ural State University (National Research University)*

(76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia, e-mail: poluninga@mail.ru)

Abstract. In the Russian Federation, the number of fires remains high. The situation is similar in the oil industry. Moreover, fires that occur during sampling are common. Fire hazards can also be associated with oil and gas leaks due to a breach in the tightness of wellhead equipment. Wear of rubber gaskets of an oil sampler is a common problem associated with chemical and mechanical effects on the gaskets. The use of low-quality or unsuitable materials also accelerates the wear process. Therefore, the authors of the article conducted research to solve this problem by replacing the conventional rubber gasket with gaskets made of alternative materials. Experimental studies were conducted with gaskets made of rubber, fluororubber and butadiene-nitrile rubber, which were subjected to mechanical and chemical effects. The best performance was shown by a sample made of butadiene-nitrile rubber, which retained its original geometric parameters.

Therefore, switching to butadiene-nitrile rubber gaskets can solve the problem of oil and gas leaks through oil samplers. This will reduce the risk of fires and, as a result, avoid large financial losses from fires and environmental disasters.

Keywords: wear, rubber gasket, leaks, rubber, fire, oil samplers, oil equipment.

Для цитирования: Богданов А.В. Снижение вероятности возникновения пожаров путем повышения герметичности нефтяных пробоотборников / А.В. Богданов, М.А. Егоров, Г.А. Полуниин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 197-201. – EDN: IMPFAI.

Введение. В Российской Федерации за последние 5 лет количество пожаров остается на высоком уровне, хотя наблюдается их некоторое снижение [1, 2]. Аналогичная ситуация в нефтяной промышленности. По некоторым данным к одним из распространенных видов пожаров относятся пожары, возникающие при отборе проб [3]. Утечки нефти и газа могут быть связаны и с нарушением герметичности устьевого оборудования [4]. Так, износ резиновых прокладок нефтяного пробоотборника – распространенная проблема.

Основными причинами износа могут быть химическое и механическое воздействия на прокладку. Это связано с тем, что контакт с нефтепродуктами, химикатами или другими агрессивными веществами вызывают преждевременное разрушение материала прокладки. А постоянные механические нагрузки и вибрации приводят к трещинам, изменению геометрических размеров прокладок и к другим повреждениям. Утечки через поврежденные прокладки могут образовывать взрывопожароопасные зоны, размеры которых ограничены нижним концентрационным пределом распространения пламени газов и паров жидкостей [5]. Поэтому исследования, направленные на снижение утечек через прокладки, являются актуальными.

Методология. Нарушение герметичности оборудования может возникнуть из-за утечек через резиновые прокладки, например, нефтяных пробоотборников [6]. Это представляет собой серьезную проблему, так как утечки приводят к пожарам в нефтяной промышленности. Они могут происходить по различным причинам, включая износ и старение прокладок, неправильную установку, а также воздействие на прокладки агрессивных химических веществ.

Утечка нефти или газа может привести к образованию легко воспламеняющихся паров, что создает риск возникновения пожара или взрыва. Чтобы минимизировать эти риски, необходимо соблюдать строгие стандарты безопасности и проводить регулярные проверки и техническое обслуживание оборудования [7]. Но утечки могут наблюдаться и между такими проверками и техническим обслуживанием. Причиной утечки могут быть прокладки, изготовленные из некачественного материала, которые во время эксплуатации изменяют свои геометрические параметры, образуя неплотности.

Поэтому авторами статьи были проведены исследования с целью решения данной проблемы

путем замены обычной резиновой прокладки на прокладку из альтернативных материалов.

Эксперимент. Для поиска возможного решения данной проблемы были проведены экспериментальные исследования по механическому и химическому воздействию на прокладку, изготовленных из различных материалов [8]. При экспериментах использовались 3 вида прокладок, подвергавшихся разным воздействиям, которые влияют на их износ.

В таблице 1 приведены материалы, из которых изготовлены прокладки, а также их геометрические размеры и стоимость.

Таблица 1 – Характеристики прокладок

Материал	Внутренний диаметр, мм	Внешний диаметр, мм	Толщина, мм	Стоимость за одну шт., руб.
Каучук	14	17,5	2	7
Фторкаучук	14	18	2	122
Бутадиен-нитрильный каучук	14	17	1,5	27

Первый эксперимент был связан с тем, что прокладки подвергались механическому воздействию. Перед опытами измерялись толщина, внутренний и внешний диаметры прокладки (табл. 1). Затем они помещались между двумя шайбами и закручивались посредством болта и гайки с усилием 20 Нм (рис. 1) с помощью динамометрического ключа Force [9]. После этого прокладки выдерживались в закрученном состоянии 10 суток. Далее они извлекались для произведения геометрических замеров.



Рисунок 1 – Прокладки, закрученные между шайбами с усилием 20 Нм

1 – прокладка из каучука; 2 – прокладка из фторкаучука;
3 – прокладка из бутадиен-нитрильного каучука

Во втором эксперименте прокладки подвергались химическому воздействию. Использовались прокладки с теми же параметрами, что и в первом эксперименте (табл. 1). Все образцы были помещены в бензин (рис. 2) и выдерживались там 10 суток. После этого прокладки извлекались для произведения геометрических замеров [10].

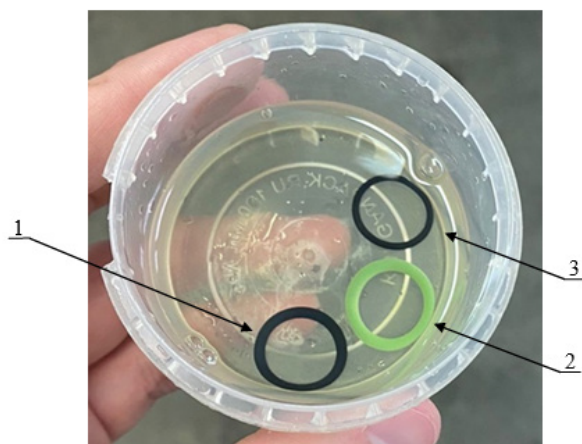


Рисунок 2 – Прокладки, помещенные в бензин
1 – прокладка из каучука; 2 – прокладка из фторкаучука;
3 – прокладка из бутадиен-нитрильного каучука

Результаты. Результаты измерений геометрических размеров прокладок после проведения эксперимента с механическим воздействием приведены в таблице 2. Необходимо отметить, что прокладка из каучука после механического воздействия на нее очень сильно изменила форму и стала овальной. Также произошел ее разрыв. По сути, прокладка «вышла из строя», что сделало невозможным произвести замеры ее геометрических параметров. Поэтому в таблице 2 поставлены прочерки для этой прокладки. Образцы из фторкаучука и бутадиен-нитрильного каучука не изменили своих размеров.

После эксперимента с химическим воздействием на аналогичные прокладки изменились гео-

метрические размеры у образцов из каучука и фторкаучука. Образец из бутадиен-нитрильного каучука не изменил своих размеров, что видно из таблиц 1 и 3.

Таблица 2 – Характеристики прокладок после механического воздействия

Материал	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина, мм
Каучук	-	-	-
Фторкаучук	14	18	2
Бутадиен-нитрильный каучук	14	17	1,5

Таблица 3 – Характеристики прокладок после химического воздействия

Материал	Внешний диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Толщина, мм
Каучук	13,5	17	1,5
Фторкаучук	18	22	3
Бутадиен-нитрильный каучук	14	17	1,5

На рисунках 3, 4 и 5 представлены диаграммы, иллюстрирующие изменения геометрических размеров прокладок после эксперимента с химическим воздействием.

Внутренний, внешний диаметры и толщина прокладки из каучука, как видно из диаграммы (рис. 3), уменьшились примерно на 0,5 мм.

Геометрические размеры прокладки из фторкаучука также изменились, но в сторону увеличения. Так, внутренний и внешний диаметры увеличились примерно на 4 мм, а толщина на 1 мм. Для наглядности это изменение представлено диаграммой на рисунке 4.

Что касается прокладки из бутадиен-нитрильного каучука, то ее размеры после проведения эксперимента с химическим воздействием остались прежними (рис. 5).

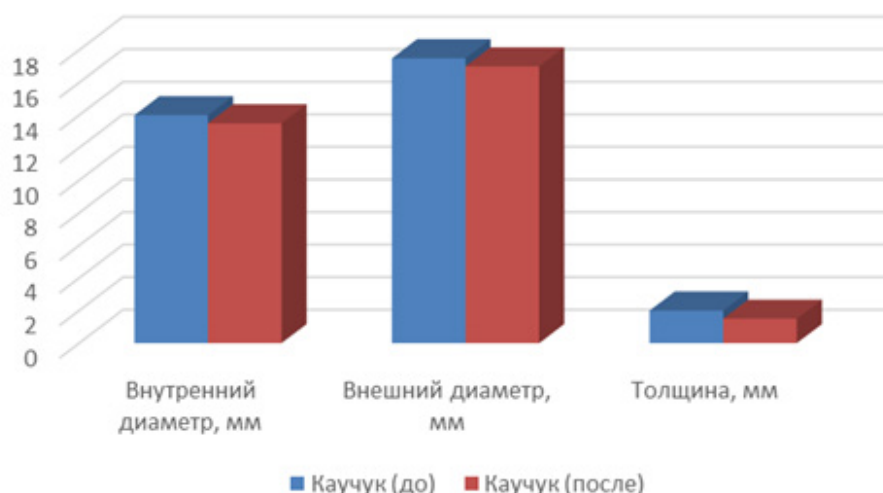


Рисунок 3 – Изменение каучука после химического воздействия

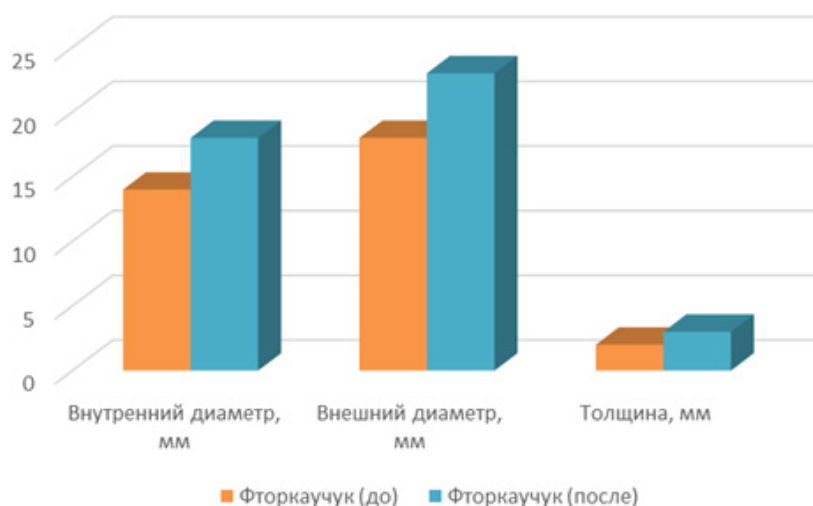


Рисунок 4 – Изменение фторкаучука после химического воздействия

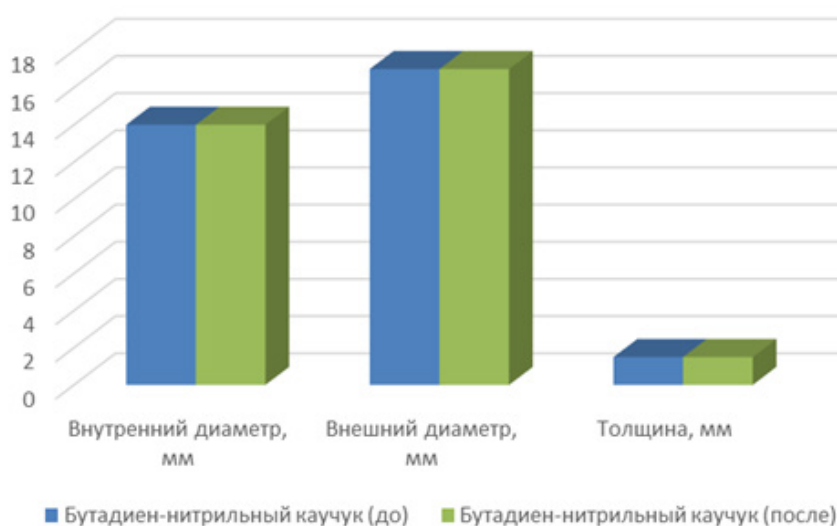


Рисунок 5 – Изменение бутадиен-нитрильного каучука после химического воздействия

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что проблему утечек можно решить простой заменой уплотнительных прокладок. Лучшее себя показал образец из бутадиен-нитрильного каучука, который сохранил свои первоначальные геометрические параметры после проведения экспериментов по механическому и химическому воздействию. Прокладка из бутадиен-нитрильного каучука немного дороже (табл. 1), чем прокладка из каучука. Но ее применение позволит снизить вероятность появления неплотности, а значит и риск возникновения пожаров и экологических катастроф из-за утечек через прокладки нефтяных пробоотборников, что будет экономически оправдано [11].

Выводы. Таким образом, переход на прокладки из бутадиен-нитрильного каучука может решить проблему с утечками нефти и газа через нефтяные пробоотборники. Это позволит сократить риски возникновения возгораний и, как следствие, избе-

жать больших финансовых потерь от пожаров и экологических катастроф. Прокладки из бутадиен-нитрильного каучука могут быть использованы и на другом нефтяном оборудовании, где требуется герметизация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Анализ статистики пожаров, произошедших на промышленных предприятиях на территории Российской Федерации. Ссылка: [https://moluch.ru/archive/511/112221/?ysclid=m6nvi3mmi299572104] (дата обращения: 16.02.2025).
2. ЧП на нефтегазовых предприятиях в России в 2020-2023 годах. Ссылка: [https://ria.ru/20230207/gaz-1850265225.html] (дата обращения: 16.02.2025).
3. Статистика пожаров на объектах нефтегазовой отрасли. Ссылка: [https://scienceforum.ru/2017/article/2017030219?ysclid=m6nvzvetln306628110] (дата обращения: 25.02.2025).
4. Текушин, Д. В. Пожарная безопасность объектов нефтегазового комплекса: учебное пособие: Ч. 2 / Д.В. Текушин, О.С. Власова – Волгоград: ВолГГУ, 2018. – 91 с.
5. Боровик С.И. Пожарная безопасность: учебное пособие к практическим занятиям / С.И. Боровик – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 160 с.
6. Пробоотборники для нефтепродуктов: виды,

стандарты ГОСТ. Ссылка: [<https://energostrana.ru/publications/probootborniki-dlya-nefteproduktov-vidy-standarty-gost-kak-vybrat-i-kupit.html?ysclid=m6nwg17v8838448173>] (дата обращения: 09.03.2025).

7. Немков М.В. Технология, техническое обслуживание и ремонт специальной нефтепромысловой техники: учебное пособие / Немков М.В. – Тюмень, 2018. – 100 с.

8. Таблица. Применимость эластомеров в различных средствах. Химическая стойкость. [<https://dpva.xyz/Guide/GuideMaterials/ApplicationLimitsTables/ElastomersToMedias1/>] (дата обращения: 09.03.2025).

9. Руководство по эксплуатации динамометрического ключа Force [<https://itescon.ru/upload/iblock/883/3уарханfvх-su2b43hfmq3j2zh1c19fd.pdf>] (дата обращения: 09.03.2025).

10. Никольский С.М. Погрешности при измерении геометрических параметров деталей ручными средствами измерений / С.М. Никольский. – Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 35. – С. 590-594.

11. Кулинкович, А.В. Экологические последствия чрезвычайных ситуаций: учебное пособие / А.В. Кулинкович, С.А. Панихидников. – Санкт-Петербург: СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. – 126 с.

Статья поступила в редакцию 04.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 613.62
EDN: ISZBQU

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ РАБОТНИКОВ ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: АНАЛИЗ И ПРОФИЛАКТИКА

© Автор(ы) 2025
SPIN: 1116-5018
AuthorID: 490222
ORCID: 0000-0003-4012-4975
ResearcherID: A-5064-2014
Scopus ID: 6505797429

ЯСТРЕБИНСКАЯ Анна Викторовна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник
научно-исследовательской лаборатории кафедры «Теоретической и прикладной химии»,
доцент кафедры «Безопасности жизнедеятельности»

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(308012, РФ, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: karanna1@mail.ru)

SPIN: 6823-1337
AuthorID: 658993
ORCID: 0000-0002-7918-5532
ResearcherID: LKJ-3248-2024
Scopus ID: 57213821171

ЕДАМЕНКО Алена Сергеевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасности жизнедеятельности»

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(308012, РФ, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: a-edamenko@mail.ru)

SPIN: 2726-5676
AuthorID: 674928
ORCID: 0000-0003-1408-8616
ResearcherID: ABB-3013-2021
Scopus ID: 56427013400

ТОМАРОВЩЕНКО Оксана Николаевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасности жизнедеятельности»

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(308012, РФ, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: ox.guzeeva@yandex.ru)

SPIN: 5391-3829
AuthorID: 1260970
ORCID: 0009-0009-2390-978X

КАНИВЕЦ Ирина Владимировна, магистрант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(308012, РФ, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, e-mail: irkanivets@gmail.com)

Аннотация. Горнорудная промышленность характеризуется опасными и вредными условиями труда, что оказывает значительное влияние на здоровье работников. Целью исследования является оценка показателей профессиональной заболеваемости на Михайловском ГОКе им. А.В. Варичева для дальнейшего совершенствования системы объективного мониторинга за состоянием здоровья работников. Задачи включают анализ заболеваемости на горнодобывающем предприятии в зависимости от стажа, профессии, воздействия вредных факторов производственной среды и типа заболевания. Методика исследования основана на изучении и обобщении данных из Актов о случаях профессиональных заболеваний на Михайловском ГОКе за четыре года. Выявлено, что самым распространенным заболеванием за исследуемый период является нейросенсорная тугоухость двухсторонняя, что составляет 58% от общего числа заболеваний; вибрационная болезнь 1 и 2 степени составляет 25%; профессиональные заболевания, вызванные воздействием пыли – 17%. При этом распределение выявленных случаев профессиональных заболеваний носит нелинейный характер, а средний стаж до обнаружения профессионального заболевания по профессиям составляет 24 года и 4 месяца. Доля выявленных заболеваний при проведении периодических медицинских осмотров составила 4%, а при самообращении – 96%. Сопоставление распределения выявленных случаев со средним стажем работы в неблагоприятных условиях по профессии показало недостаточный уровень раннего диагностирования профессиональных заболеваний на горнодобывающем предприятии, что может привести к потере трудоспособности и дефициту квалифицированных специалистов. В статье предложен обобщенный комплексный подход к решению этой проблемы, включающий перечень мероприятий технической, организационной и санитарно-гигиенической направленности. Результаты исследования могут быть использованы для разработки и внедрения практических рекомендаций по улучшению системы охраны труда на горнодобывающих предприятиях, что позволит снизить риск возникновения

профессиональных заболеваний, повысить эффективность труда.

Ключевые слова: охрана труда, Михайловский ГОК, профессиональные заболевания, вредные производственные факторы, периодический медицинский осмотр, стаж работы.

OCCUPATIONAL DISEASES OF WORKERS IN THE MINING INDUSTRY: ANALYSIS AND PREVENTION

© The Author(s) 2025

YASTREBINSKAYA Anna Viktorovna, candidate of technical sciences, docent,
senior researcher Research Laboratory Department of Theoretical and Applied Chemistry,
associate professor of the Department of Life Safety

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russian Federation, Belgorod, Kostyukova St., 46, e-mail: karanna1@mail.ru)

EDAMENKO Alena Sergeevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Life Safety
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russian Federation, Belgorod, Kostyukova St., 46, e-mail: a-edamenko@mail.ru)

TOMAROVSHCHENKO Oksana Nikolaevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Life Safety
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russian Federation, Belgorod, Kostyukova St., 46, e-mail: ox.guzeeva@yandex.ru)

KANIVETS Irina Vladimirovna, master's student
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russian Federation, Belgorod, Kostyukova St., 46, e-mail: irkanivets@gmail.com)

Abstract. The mining industry is characterized by dangerous and harmful working conditions, which has a significant impact on the health of workers. The purpose of the study is to evaluate the indicators of occupational morbidity at the Mikhailovsky GOK named after A.V. Varichev in order to further improve the system of objective monitoring of the health status of employees. The tasks include the analysis of morbidity in a mining enterprise depending on the length of service, profession, exposure to harmful factors of the working environment and the type of disease. The research methodology is based on the study and generalization of data from the Acts on occupational diseases at Mikhailovsky GOK for four years. It was revealed that the most common disease during the study period was bilateral sensorineural hearing loss, which accounted for 58% of the total number of diseases, vibration sickness of the 1st and 2nd degrees accounted for 25%, occupational diseases caused by exposure to dust – 17%. At the same time, the distribution of detected cases of occupational diseases is non-linear, and the average length of service before the detection of an occupational disease by profession is 24 years and 4 months. The proportion of detected diseases during periodic medical examinations was 4%, and 96% during self-treatment. A comparison of the distribution of identified cases with the average length of service in unfavorable conditions by profession showed an insufficient level of early diagnosis of occupational diseases at a mining enterprise, which can lead to disability and a shortage of qualified specialists. The article offers a generalized integrated approach to solving this problem, including a list of technical, organizational, and sanitary-hygienic measures. The results of the study can be used to develop and implement practical recommendations for improving the occupational safety system at mining enterprises, which will reduce the risk of occupational diseases and increase labor efficiency.

Keywords: occupational safety, Mikhailovsky GOK, occupational diseases, harmful production factors, periodic medical examination, work experience.

Для цитирования: Ястребинская А.В. Профессиональные заболевания работников горнорудной промышленности, анализ и профилактика / А.В. Ястребинская, А.С. Едаменко, О.Н. Томаровщенко, И.В. Канивец // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 202-209. – EDN: ISZBQU.

Введение. Горнорудная промышленность характеризуется опасными и вредными условиями труда, что оказывает значительное влияние на здоровье работников [1]. В процессе работы задействовано множество факторов, негативно воздействующих на организм. Вопросы безопасности труда и охраны здоровья в этой отрасли требуют всестороннего анализа рабочих условий и особенностей производственных процессов, с учетом применяемого оборудования и технологий. Особое внимание уделяется оценке воздействия таких вредных факторов, как пыль, шум и вибрация,

уровень которых может существенно превышать допустимые нормы, что повышает риск развития профессиональных заболеваний [2].

Пневмокониоз, хронический бронхит и заболевания верхних дыхательных путей наиболее распространенные профессиональные заболевания, вызванные воздействием пыли. Наиболее частая форма пневмокониоза – силикоз. Он развивается у работников, подвергающихся воздействию высокой концентрации пыли, особенно при выполнении тяжелого физического труда на протяжении 5 лет и более. Силикоз преимущественно распространен

среди рабочих горнорудной промышленности, таких как бурильщики и крепильщики. Согласно имеющимся данным силикоз развивается в течение 4-6 лет после начала работы и постепенно прогрессирует от одной стадии к другой. Поздняя форма силикоза с доброкачественным развитием возникает спустя 15 или более лет после начала контакта работника с производственной пылью [3, 4].

Силикоз воздействует на весь организм, что проявляется в нарушении дыхательных функций (одышка, кашель, боли в груди), обмена веществ, хроническом бронхите и сбоях в работе центральной и вегетативной нервной системы. Характерной особенностью силикоза является его продолжающееся развитие даже после прекращения воздействия пыли. При этом стоит отметить низкую диагностику хронического профессионального бронхита. Обусловлено это тем, что хронический «простой бронхит» мало регистрируется, и первичная диагностика осуществляется чаще во второй стадии, при наличии выраженных обструктивных изменений [5].

Воздействие шума также негативно сказывается на здоровье работников. Шум может подавлять центральную нервную систему, изменять ритмы дыхания и пульса, нарушать обмен веществ и способствовать развитию сердечно-сосудистых заболеваний, таких как гипертония. Длительное воздействие шума свыше 80 дБА вызывает утомление, снижает слуховую чувствительность, которая временно восстанавливается после прекращения воздействия шума. Однако более продолжительное или интенсивное воздействие может привести к постоянным нарушениям слуха, таким как профессиональная тугоухость или даже к полной глухоте. При воздействии шума более 120 дБА возможны шумовые травмы. Шумовая болезнь, представляющая собой сочетание профессиональной тугоухости с нарушениями в работе центральной нервной, вегетативной, сердечно-сосудистой и других систем, является серьезным профессиональным заболеванием и требует особого внимания. Шумовая патология регистрируется как локальная, в виде неврита слухового нерва, через 15-20 лет от начала работы в контакте с шумом [6, 7]. Однако у 15 % работающих в условиях воздействия интенсивного шума нередко жалобы возникают задолго до поражения слухового анализатора [8].

Воздействие вибрации на организм человека может иметь серьезные последствия, поскольку она ухудшает работоспособность и реакцию, а также нарушает координацию движений. Вибрация не только влияет на различные системы организма, включая сердечно-сосудистую, нервную, кровеносную, вестибулярный аппарат, но также может вызывать изменения в костях и мышцах [9, 10]. Стойкие изменения, возникающие в результате длительного воздействия вибрации, называют вибрационной болезнью. Симптомами являются

боли в кистях и предплечьях, судороги, головная боль, нарушение болевой чувствительности, повышенная чувствительность к холоду, бессонница, а также патологические изменения в костных тканях, сердечно-сосудистой системе и спинном мозге. В последнее годы развитие заболеваний вибрационной этиологии характеризуется увеличением латентного периода, медленным прогрессированием. Первые признаки вибрационной болезни у горнорабочих возникают после 10 лет работы, а вибрационная болезнь 1-й стадии – при сроке работы свыше 15 лет [10, 1, 2].

Целью исследования является анализ показателей профессиональной заболеваемости на Михайловском ГОКе им. А.В. Варичева для дальнейшего совершенствования системы объективного мониторинга за состоянием здоровья работников.

Проблема профессиональных заболеваний в горнорудной промышленности является актуальной и комплексной, требующей междисциплинарного подхода, объединяющего усилия медицины и охраны труда. Медицинские научные изыскания затрагивают вопросы патогенеза механизмов развития профзаболеваний, создания эффективных терапевтических методик для их лечения и реабилитации больных (Кузьменко О.В., Гордеева Р.В. [11]; Жеглова А.В. [12]; Исакова Д.Р., Тергулова З.С. [13]; Захаренков В.В., Страшников Т.Н. [14] и др.). Исследования в области обеспечения безопасности труда направлены на разработку мероприятий, позволяющих снизить вероятность возникновения и тяжесть последствий профессиональной заболеваемости среди работников горнорудной отрасли (Бухтияров И.В., Чеботарев А.Г. [15], Колесников Б.Л., Егорова Е.М. [16], Преображенская Е.А., Сухова А.В. [17] и др.). Количество случаев профессиональной заболеваемости в горнорудной сфере продолжает оставаться высоким, что подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований и разработок. В отличие от традиционных методов, в исследовании предложен комплексный подход, заключающийся в разработке интегрированной модели профилактики и объективного мониторинга за состоянием здоровья работников, которая будет учитывать специфику условий труда на горнодобывающих предприятиях.

Методология. Основой работы является обобщение исследований, направленных на выявление профессиональных заболеваний. Анализ частоты возникновения, структуры и ключевых факторов, влияющих на их развитие, проведен на основании актов о профессиональном заболевании, карт учета профессионального заболевания и санитарно-гигиенических характеристик условий труда.

Предлагаемые методические подходы для снижения риска возникновения профессиональных заболеваний включают использование различных методов, таких как методы описательной статистики, системный анализ данных с применением

статистических методов, а также мониторинг случаев возникновения профессиональной заболеваемости.

Результаты. Объектом исследования является Михайловский ГОК им. А. В. Варичева, расположенный в г. Железногорске Курской области. Основная сфера деятельности – добыча открытым способом и обогащение железной руды.

В таблице 1 представлены данные о профессиональных заболеваниях в период 2020-2023 гг. на рассматриваемом предприятии.

Исходя из представленных данных, самым распространенным заболеванием за рассматриваемый

период является нейросенсорная тугоухость двухсторонняя, что составляет 58% от общего числа заболеваний; вибрационная болезнь I и II степени составляет 25%; профессиональные заболевания, вызванные воздействием пыли, – 17%.

В таблице 2 представлены данные общего количества и доли впервые выявленных профессиональных заболеваний среди работников МГОКа относительно статистических данных Росстата [18], представленных для добычи полезных ископаемых в РФ и Центральном Федеральном Округе.

Таблица 1 – Статистика профессиональных заболеваний в период 2020-2023 гг. (составлено авторами)

Профессиональные заболевания	Количество выявленных случаев			
	2020	2021	2022	2023
Вегето-сенсорная полинейропатия верхних и нижних конечностей от комплекса производственных факторов (ВСП)	1	-	-	-
Вибрационная болезнь I степени (ВБ)	2	-	1	-
Вибрационная болезнь II степени (ВБ)	2	1	-	-
Нейросенсорная тугоухость двухсторонняя (НТД)	4	1	6	3
Силикоз	-	1	1	-
Профессиональная хроническая обструктивная болезнь легких (ПХОБЛ)	-	1	-	-
Хронический пылевой необструктивный бронхит (ХПНБ)	-	1	-	-

Таблица 2 – Доля впервые выявленных профессиональных заболеваний на МГОК относительно РФ и ЦФО (составлено авторами)

Показатель	Количество выявленных случаев			
	2020	2021	2022	2023
Общее количество впервые выявленных профзаболеваний в РФ (добыча полезных ископаемых)	907	1091	1160	1221
Доля профессиональных заболеваний работников МГОК от всех впервые зарегистрированных в РФ, %	0,99	0,46	0,69	0,25
Общее количество впервые выявленных профзаболеваний в ЦФО (добыча полезных ископаемых)	42	48	76	65
Общее количество впервые выявленных профзаболеваний в Курской области (добыча полезных ископаемых)	9	5	8	3
Доля профессиональных заболеваний работников МГОК от всех впервые зарегистрированных в ЦФО, %	21,43	10,42	10,53	4,61

Определена доля рассматриваемых профессиональных заболеваний работников МГОК от всех впервые зарегистрированных в горнодобывающей промышленности по РФ. В соответствии с данными таблицы 2 наблюдается снижение в 2021 году относительно 2020 года. По всей видимости, это связано с ограничениями на работу, введенными в период пандемии *Covid*, такими как использование удаленной работы для части работников, а в период с 30 марта по 11 мая 2020 г., в целом по стране действовал режим нерабочих дней с сохранением заработной платы. Кроме того в указанный период профилактические медицинские осмотры и диспансеризация были приостановлены в связи с эпидемиологической обстановкой. В МГОК профзаболевания были выявлены при самообращении.

На рисунке 1 представлено распределение числа выявленных случаев профессиональных заболеваний от воздействия ВПФ (вредных производственных факторов) – вибрации, шума и пыли за 2020-2023 гг.

Как видно из рисунка 1, распределение выявленных случаев профессиональных заболеваний носит нелинейный характер. При этом от воздействия производственного шума каждый год из рассматриваемого периода выявляются работники с нейросенсорной двусторонней тугоухостью, что составляет более половины всех случаев возникновения профессиональных заболеваний.

В таблице 3 представлен средний стаж работы в неблагоприятных условиях по профессии до обнаружения профессионального заболевания и число выявленных случаев.

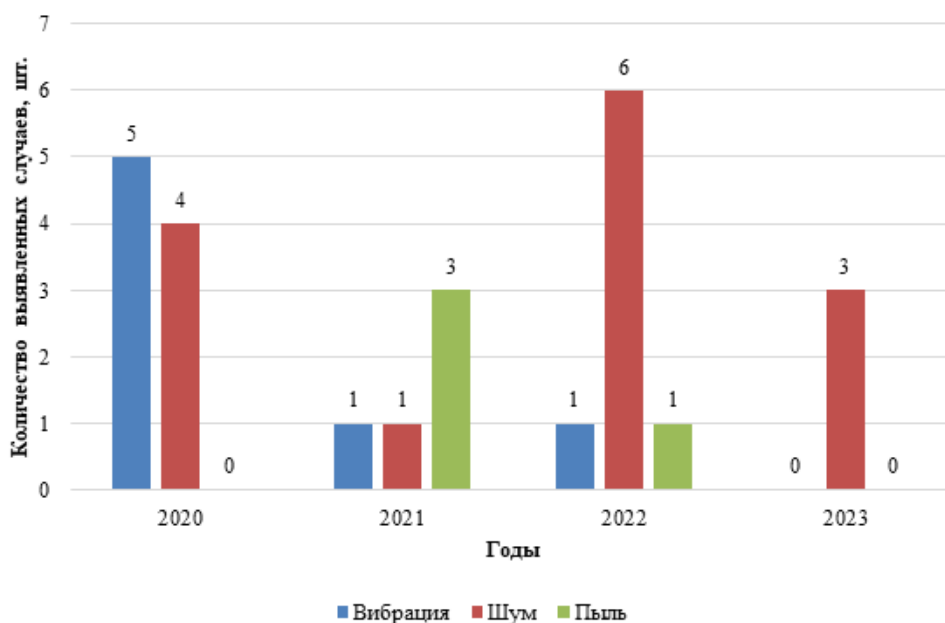


Рисунок 1 – Распределение количества выявленных профессиональных заболеваний от воздействия ВПФ в период 2020-2023 гг. (составлено авторами)

Таблица 3 – Средний стаж работы по профессии до обнаружения профессионального заболевания и число выявленных случаев (составлено авторами)

Профессия	Средний стаж работы	Количество выявленных случаев
Водитель автомобиля по выгрузке горной массы из карьера	18 лет 4 месяца	6
Слесарь-ремонтник	23 года 2 месяца	3
Электрогазосварщик	26 лет 9 месяцев	4
Машинист экскаватора	30 лет 10 месяцев	2
Машинист бульдозера	38 лет	1
Дробильщик	20 лет 3 месяца	1
Машинист конвейера	13 лет	1
Электрослесарь по ремонту электрических машин	28 лет 7 месяцев	1
Водитель автомобиля (в карьере)	15 лет 6 месяцев	1
Кузнец на молотах и прессах	23 года 1 месяца	1
Заливщик металла	28 лет 2 месяца	1
Водитель автомобиля	32 года 7 месяцев	1
Резчик на перилах, ножовках и станках	27 лет 2 месяца	1
Механик участка	15 лет	1

Водитель автомобиля по выгрузке горной массы из карьера наиболее подвержен риску развития всех представленных выше профессиональных заболеваний. При этом средний стаж работы у водителей 18 лет и 4 месяца. Самый минимальный средний стаж до выявления болезни у машиниста конвейера (13 лет), механика участка (15 лет) и водителя автомобиля в карьере (15 лет 6 месяцев). Таким образом, средний стаж до обнаружения профессионального заболевания по профессиям составляет 24 года и 4 месяца.

Как видно из данных рисунка 2, наибольшее количество выявленных профессиональных заболеваний приходится на стаж работы в условиях воздействия вредных и неблагоприятных производственных факторов от 26 до 30 лет. При этом следует отметить, что только один из всех выявленных случаев профессиональных заболеваний

был диагностирован во время периодического медицинского осмотра, в то время как остальные случаи – при личном обращении работников в медучреждения. Таким образом, можно предположить, что наблюдался формальный подход к проведению периодических медицинских осмотров работников предприятия. Необходимо отметить, что целью проведения периодических медицинских осмотров является диагностирование первых признаков развития профессиональных заболеваний, что позволяет работодателю принять все необходимые меры для недопущения развития заболеваний у работника в дальнейшем. Учитывая тот факт, что большинство случаев профессиональных заболеваний на предприятии выявляется только при личных обращениях работников в медицинские организации, следует рекомендовать проведение периодических углубленных медицинских осмотров

для работников всех профессий, у которых выявлены вредные условия труда.

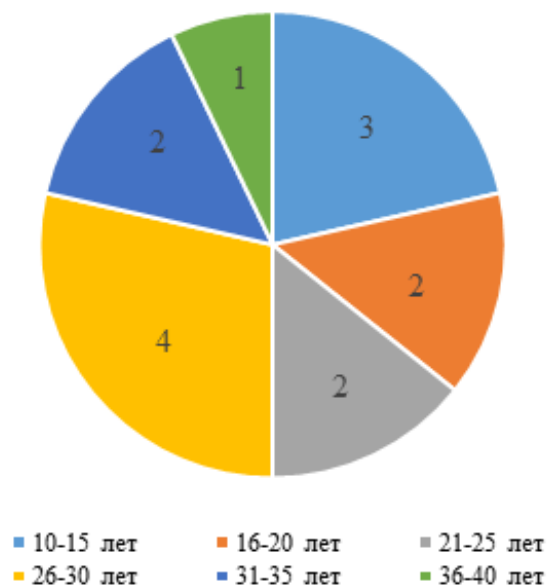


Рисунок 2 – Распределение количества профессиональных заболеваний от стажа работы (составлено авторами)

В таблице 4 представлены выявленные случаи профессиональных заболеваний у работников рассматриваемых профессий.

Анализируя данные таблицы 4, зная общий стаж работы, возраст работника и общее время воздействия ВПФ, можно сделать вывод, что отсутствие или формальный подход к обязательному периодическому осмотру увеличивает риск развития профессиональных заболеваний. Так виброблезнь I степени установлена при личном обращении работников в возрасте 41 год, 55 лет и 57 лет. Это позволяет полагать, что в случае своевременного и качественного медицинского осмотра, первые признаки развития профессиональных заболеваний могли быть определены значительно раньше.

По имеющимся данным, доля выявленных профессиональных заболеваний в результате самообращения работников представлена на рисунке 3.

По результатам обработки данных о профессиональных заболеваниях можно сделать вывод, что доля выявленных случаев при проведении периодических медицинских осмотров составила 4%, в то время как при самообращении – 96%.

Исходя из вышеизложенного, имеет место недостаточный уровень раннего диагностирования профессиональных заболеваний на горно-обогатительном комбинате. В дальнейшем это приведет к утрате трудоспособности и нехватке квалифицированных кадров.

Основополагающие причины профессиональных заболеваний представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Распределение профессиональных заболеваний по профессиям (составлено авторами)

Профессия	Количество выявленных случаев						
	ВСП	ВБ I ст.	ВБ II ст.	НТД	Силикоз	ПХОБЛ	ХПНБ
Водитель автомобиля по выгрузке горной массы из карьера	1	1	2	1	1	-	-
Слесарь-ремонтник	-	-	-	2	-	-	1
Электрогазосварщик	-	-	-	4	-	-	-
Машинист экскаватора	-	2	-	-	-	-	-
Машинист бульдозера	-	-	-	1	-	-	-
Дробильщик	-	-	-	-	1	-	-
Машинист конвейера	-	-	-	-	-	1	-
Электрослесарь по ремонту электрических машин	-	-	-	1	-	-	-
Водитель автомобиля (в карьере)	-	-	1	-	-	-	-
Кузнец на молотах и прессах	-	-	-	1	-	-	-
Заливщик металла	-	-	-	1	-	-	-
Водитель автомобиля	-	-	-	1	-	-	-
Резчик на перилах, ножовках и станках	-	-	-	1	-	-	-
Механик участка	-	-	-	1	-	-	-

Таблица 5 – Причины профессиональных заболеваний (составлено авторами)

Профессиональное заболевание	Причины
Вегето-сенсорная полинейропатия	Функциональное перенапряжение отдельных органов и систем, длительное воздействие физических перегрузок, локальной и общей вибрации
Вибрационная болезнь	Длительное воздействие локальной и общей вибрации
Нейросенсорная тугоухость	Длительное воздействие производственного шума
Силикоз	Воздействие высокофиброгенной пыли в концентрациях, превышающих ПДК
Профессиональная хроническая обструктивная болезнь легких	Воздействие высокофиброгенной кварцсодержащей пыли
Хронический пылевой необструктивный бронхит	Воздействие производственной пыли



Рисунок 3 – Доля выявленных случаев профессиональных заболеваний для работников разных профессий (составлено авторами)

Обсуждение. Для снижения риска возникновения профессиональных заболеваний на горно-обогатительном комбинате следует применять комплексный подход, включающий перечень мероприятий технической, организационной и санитарно-гигиенической направленности. Рекомендуемые меры по снижению вредного воздействия производственной вибрации, шума и запыленности рабочего места предложены ниже.

Для уменьшения воздействия физических перегрузок и вибрации следует применять виброизолирующие инструменты и оборудование, внедрить системы автоматизации и механизации производственных процессов, делать регулярные перерывы в работе для восстановления организма, а также использовать средства индивидуальной защиты, ограничивать время работы с вибрационным инструментом, проводить лечебно-профилактические мероприятия (массаж, физиотерапию).

В целях защиты работника от воздействия производственного шума необходимо применять шумозащитные наушники или беруши, шумопоглощающие экраны, звукоизоляцию оборудования, проводить регулярные аудиометрические обследования для раннего выявления слуховых нарушений, соблюдать рациональный режим труда и отдыха и снижать время пребывания в шумных зонах.

Для защиты от воздействия высокофиброгенной пыли следует устанавливать эффективные системы аспирации и пылеулавливания на всех стадиях технологического процесса, применять респираторы, проводить влажную обработку поверхностей, осуществлять регулярный контроль концентрации пыли, организовать режим труда и отдыха, включая мероприятия по закаливанию и укреплению

здоровья работников.

Конкретные технические мероприятия должны проектироваться с учетом специфики рабочих мест.

Обязанностью работодателя является разработка и реализация различных мер по предупреждению профессиональных заболеваний, а в случае выявления – реализация целого ряда направлений, предназначенных для снижения вероятности возникновения их у работников [19, 20].

Выводы. Учитывая установленную проблему с выявлением случаев профессиональных заболеваний (основная доля выявляется при самообращении работников) и низким уровнем раннего диагностирования профессиональных заболеваний на данном предприятии, необходимы мероприятия по совершенствованию процедуры наблюдения за состоянием здоровья работников (мониторинг состояния здоровья) в рамках системы управления охраной труда предприятия.

Объективный мониторинг за состоянием здоровья работников включает в себя проведение качественных периодических медицинских осмотров, своевременное обнаружение патологических изменений, использование современных и эффективных средств индивидуальной защиты и осуществление лечебно-оздоровительных мероприятий. Данный подход позволяет значительно снизить риск возникновения профессиональных заболеваний на горно-обогатительных предприятиях, продлить трудоспособность и снизить дефицит человеческих ресурсов.

С целью защиты интересов как рассматриваемого предприятия в целом, так и его работников, в данной статье не приведены подробные результаты исследования, что обусловлено необходимостью соблюдения принципов конфиденциальности и

этических норм, регламентирующих научные исследования. При этом отраженные результаты обладают значительной практической значимостью, представляя собой ценный ресурс для руководителей предприятий горнодобывающей отрасли и сотрудников отделов охраны труда. Рекомендации и выводы могут служить основой для проведения анализа и оценки текущих условий труда, а также для разработки и внедрения необходимых корректирующих мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сюрин С.А., Никанов А.Н. Риски здоровью горняков, занятых на подземных буровзрывных работах на рудниках Кольского полуострова // Российская Арктика. – 2024. – № 6(2). – С. 35–45. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-2-35-45>.
2. Бухтияров И.В., Зибарев Е.В., Вострикова С.М., Кравченко О.К., Пиктушанская Т.Е., Кузнецова Е.А. и др. Современное состояние условий труда в угольных шахтах России // Медицина труда и промышленная экология. – 2023. № – 63(6). – С. 348–358. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-6-348-358>.
3. Домарев С.Н., Божко У.А., Захлевная И.И. Силикоз, как возможный фактор канцерогенного риска в добывающей промышленности / Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16-17 мая 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 79–84. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54377851_76271951.pdf (дата обращения 04.09.2024).
4. Barnes H, Goh NSL, Leong TL, Hoy R. Silica-associated lung disease: An old-world exposure in modern industries. *Respirology*. – 2019 – Vol. 24(12). – P. 1165–1175. <https://doi.org/10.1111/resp.13695>.
5. Zheng XY, Zheng YJ, Liao TT, Xu YJ, Liu L, Wang Y, et al. Effects of occupational exposure to dust, gas, vapor and fumes on chronic bronchitis and lung function. *J Thorac Dis*. – 2024. – Vol. 16(1). – P. 356–367. <https://doi.org/10.21037/jtd-23-646>.
6. Шилов В.В., Бойко И.В., Ковшов А.А., Никанов А.Н., Петрухин Н.Н., Куприна Н.И. Формирование риска возникновения профессиональной тугоухости у работников горнопромышленного комплекса Кольского Заполярья / Сборник научных трудов IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы гигиены (Санкт-Петербург-2024)». Санкт-Петербург: Издательство Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова. – 2024. – С. 270–278. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_65288445_81934029.pdf (дата обращения: 28.09.2024).
7. Dhatrak SV, Shah IA, Prajapati SS. Determinants of discomfort from combined exposure to noise and vibration in dumper operators of mining industry in India. *J Occup Environ Hyg*. – 2024. – Vol. 21(6). – P. 389–396. <https://doi.org/10.1080/15459624.2024.2328296>.
8. Masterson EA, Deddens JA, Themann CL, Bertke S, Calvert GM. Trends in worker hearing loss by industry sector, 1981–2010. *Am J Ind Med*. – 2015. – Vol. 58(4). – P. 392–401. <https://doi.org/10.1002/ajim.22429>.
9. Трифонов А.П., Будаев Д.Д., Алябьева К.А. Влияние вибрации на организм человека, методы борьбы с вибрацией на производстве / Сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых «2-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Школа молодых новаторов». Курск: Издательство Юго-Западный государственный университет. – 2021. – С. 41–45. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46309073_87682626.pdf (дата обращения: 15.09.2024).
10. Сухова А.В. Профессиональный риск заболеваний периферической нервной системы и опорно-двигательного аппарата у рабочих горно-обогатительных комбинатов. Дис. д-р мед. наук. Москва. – 2011. – 49 с.
11. Гордеева Р.В., Филимонов С.Н., Кузьменко О.В., Мартынова Е.А., Анищенко Т.И. Медицинская реабилитация работников металлургической и угольной промышленности с профессиональными заболеваниями органов дыхания. Ижевск: Принт-2. – 2016. – 230 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26779681> (дата обращения 04.09.2024).
12. Жеглова А.В. Системный подход к управлению профессиональным риском нарушений здоровья работников горнорудной промышленности: специальность 14.00.50: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук. Мытищи. – 2009. – 43 с. URL: <https://elibrary.ru/nqukh> (дата обращения: 05.09.2024).
13. Исхакова Д.Р., Терегулова З.С., Каримова Л.К., Алакаева Р.А., Таирова Э.И. Современные подходы к профилактике профессиональных заболеваний на предприятиях горнорудной промышленности // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. – 2006. – № 3(49). – С. 106–108. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2023-63-8-537-544>.
14. Захаренков В.В., Страшников Т.Н., Олещенко А.М., Суржиков Д.В., Кислицына В.В., Корсакова Т.Г. Оценка профессиональной заболеваемости работников горнорудной промышленности // Медицина труда и промышленная экология. – 2015. – № 9. – С. 56–56. URL: <https://www.journal-irioh.ru/jour/article/view/161/151> (дата обращения: 05.09.2024).
15. Бухтияров И.В., Чеботарев А.Г., Курьеров Н.Н., Сокур О.В. Актуальные вопросы улучшения условий труда и сохранения здоровья работников горнорудных предприятий // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. № 1(7). – С. 424–429. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-7-424-429>.
16. Колесников Б.Л., Егорова Е.М., Редина О.С. Анализ профессиональной заболеваемости работников горнорудной промышленности в Оренбургской области // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. № 9. – С. 650–650. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-9-650-651>.
17. Сухова А.В., Преображенская Е.А. Оценка риска профессиональной неврологической патологии, связанной с воздействием физических факторов // Медицина труда и промышленная экология. – 2017. – № 9. – С. 182–182. URL: <https://www.journal-irioh.ru/jour/article/view/951/941> (дата обращения: 05.09.2024).
18. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 06.09.2024).
19. Томаровщенко, О. Н., Петрова П.П., Тюпин Д.М. Совершенствование системы управления охраной труда в организациях горно-металлургической отрасли / Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования (Белгород – 2023)». Белгород: Издательство Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2023. – С. 110–113. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54964780_64281747.pdf (дата обращения: 11.09.2024).
20. Климова Е.В., Семейкин А.Ю., Томаровщенко О.Н., Петрова В.А., Будков А.А. Оценка эффективности обучения по охране труда работников на основе опережающих индикаторов травматизма / Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 12. – С. 3–8.

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Статья поступила в редакцию 21.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 656.2

EDN: JAWTND

ОРГАНИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ РАБОТНИКОВ РЕМОНТНО-ПУТЕВОГО КОМПЛЕКСА

© Автор(ы) 2024

SPIN: 6423-4715

AuthorID: 1242277

ORCID: 0009-0002-9635-0613

ПИМЕНОВА Юлия Владимировна, преподаватель учебно-методического центра

Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта

Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

(125438, Россия, г. Москва, Пакгаузное шоссе, дом 1, кор. 1, e-mail: EMC-VNIJG@yandex.ru)

Аннотация. Статья содержит результаты исследований организации питания работников ремонтно-путевого комплекса на примере монтеров пути, занятых реконструкцией и капитальным ремонтом железнодорожных путей. В условиях разъездного характера работ особую важность для поддержания работоспособности и здоровья путевых рабочих приобретает рациональная организация питания. Исследование проводилось в целях изучения гигиенических характеристик фактических рационов питания и разработки комплекса рекомендаций по их корректировке, направленных на восполнение адаптационного потенциала работников к неблагоприятным условиям труда. Основными задачами работы стали: изучение качественного и количественного состава пищевых рационов. Обозначены объекты контроля: структура и разнообразие суточных рационов, калорийность, витаминная обеспеченность, весовые показатели готовых блюд, режимы питания работников. Оценка рационов питания проводилась методом расчета (обработки) основных компонентов пайков с применением таблиц химического состава Российских пищевых продуктов. По данным исследования установлено нарушение принципов рациональности фактического питания, связанное с недостатком энергетической ценности зимних суточных рационов в отдельных геоклиматических зонах на фоне высокой физической активности персонала. Выявлены недостатки в обеспечении работников исследуемой профессиональной группы, занятых в ночное время, горячим питанием. По результатам оценки питьевого режима путевых рабочих, сформулированы рекомендации по включению в суточные рационы тонизирующих, витаминизированных и минеральных напитков. Обозначены трудности соблюдения правил личной гигиены в условиях отсутствия на перегонах санитарно-гигиенических пунктов, предложены мероприятия, направленные на обеспечение защиты работников от неблагоприятного воздействия биологического фактора. Полученные результаты позволили сформулировать обоснованные выводы о необходимости коррекции фактических рационов питания монтеров пути за счет поступления необходимого количества калорий (энергии), включения в рационы рабочих ночных смен горячих блюд и напитков, расширения разнообразия пайков и обогащения последних микронутриентами (витаминами, минеральными веществами и их комплексами).

Ключевые слова: безопасность труда, монтеры пути, работники тяжелого физического труда, путевые работы, питание в организованных коллективах, организация рационального питания, энерготраты работников, группы интенсивности труда, режим приема пищи, питьевой режим, сухие пайки, круглосуточный режим работы, ночные смены.

CATERING FOR EMPLOYEES OF THE REPAIR AND TRACK COMPLEX

© The Author(s) 2025

PIMENOVA Yulia Vladimirovna, teacher at the training and methodological centre

All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of the Federal Service for Supervision of

Consumer Rights Protection and Human Welfare

(127994, Russia, Moscow, Pakgauz str. 1, p. 1, e-mail: PimenJ@yandex.ru)

Abstract. The article contains the results of research on catering for employees of the track repair complex using the example of track fitters engaged in the reconstruction and overhaul of railway tracks. In conditions of the traveling nature of work, rational nutrition is of particular importance for maintaining the working capacity and health of traveling workers. The study was conducted in order to study the hygienic characteristics of actual diets and develop a set of recommendations for their adjustment aimed at replenishing the adaptive potential of employees to adverse working conditions. The main objectives of the work were to study the qualitative and quantitative composition of food rations. The objects of control are indicated: the structure and variety of daily rations, caloric content, vitamin availability, weight indicators of ready meals, nutrition regimes of employees. According to the study, a violation of the principles of rationality of actual nutrition has been established, associated with a lack of energy value of winter daily rations in certain geoclimatic zones against the background of high physical activity of personnel. Shortcomings have been identified in providing hot meals to employees of the professional group under study who are employed at night. Based on the results of the assessment of the drinking regime of the traveling workers, recommendations were formulated for the inclusion of tonic, vitaminized and mineral drinks in the daily rations. The difficulties of observing the rules of personal hygiene in the absence of sanitary and hygienic points on the tracks are outlined, and measures aimed at ensuring the protection

of workers from the adverse effects of biological factors are proposed. The results obtained made it possible to formulate reasonable conclusions about the need to correct the actual diets of fitters due to the intake of the required number of calories (energy), the inclusion of hot meals and drinks in the diets of night shift workers, the expansion of the variety of rations and the enrichment of the latter with micronutrients (vitamins, minerals and their complexes).

Keywords: labor safety, track fitters, workers of heavy physical labor, travel work, nutrition in organized groups, organization of rational nutrition, energy consumption of workers, labor intensity groups, meal schedule, drinking regime, dry rations, round-the-clock work, night shifts.

Для цитирования: Пименова Ю.В. Организация питания работников ремонтно-путевого комплекса / Ю.В. Пименова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 210-216. – EDN: JAWTND.

Введение. Исследования, посвященные вопросам организации рационального питания для работающих в различных профессионально-производственных условиях, свидетельствуют, что организация питания в коллективах позволяет сохранить и укрепить здоровье трудящихся, повысить сопротивляемость организма неблагоприятным воздействиям производственных вредностей, профилактировать развитие профессиональных заболеваний, повысить уровень производительности и работоспособности персонала [1-3]. Здоровое и правильное питание позволяет работодателю избежать в процессе производства работ целого ряда нежелательных последствий, таких как снижение производительности труда и нарушение техники безопасности [4, 5].

Работа в ремонтно-путевом комплексе железнодорожного транспорта характеризуется высокой травмоопасностью, условия труда подразумевают значительное и продолжительное физическое напряжение (физическую работу, мышечную нагрузку), ряд профессиональных вредностей – шумовые раздражители, вибрация, воздействующая через рукоятки путевого инструмента, неблагоприятные климатические условия, погодные явления большую часть года и т.д., а также сложные специфические производственные условия и требования, обусловленные отраслевой и служебной принадлежностью – неупорядоченное чередование режимов труда и отдыха, неупорядоченные (хаотические) режимы питания, отсутствие фиксированного (стационарного) рабочего места, непрерывное перемещение по линии по мере выполнения объемов работ, продолжительное проживание в вагонах рабочих поездов при частой смене места их дислокации, сменная работа, в том числе и ночная, нередко выполнение технологических операций происходит в навязанном темпе, когда соблюдение тайминга критично и вызывает нервно-эмоциональное напряжение работников. [6-10]. Сложные производственные условия, в которых путейцы реализуют трудовую функцию, создают риски возникновения и развития профессиональных и профессионально-обусловленных патологий – болезней сердечно-сосудистой, нервной, костно-мышечной систем, желудочно-кишечного тракта и т.д., а также предъявляют повышенные требо-

вания к функциональному состоянию перечисленных органов и систем [11]. В последние годы в исследованиях нутрициологов уделяется большое внимание алиментарным факторам (энергетическому равновесию, режиму питания и пр.), которые являются залогом поддержания баланса между человеком и окружающей средой. Здоровое и рациональное (оптимальное) питание обеспечивает защиту организма человека от воздействия неблагоприятных условий окружающей среды, оказывает поддержку иммунной системе и адаптационному потенциалу работников, чей труд характеризуется профессиональными вредностями [12].

В этой связи особую важность приобретают гигиенические мероприятия, в том числе возрастает значение вопросов гигиенических характеристик питания отдельных профессиональных групп населения. В настоящее время акцент смещается в сторону оптимизации рационов и формирования лечебно-профилактического питания, направленных на восполнение акклиматизационных дефицитов, ускорение процессов вывода вредных веществ и снижение токсической нагрузки на организм работников, повышение общей устойчивости функциональных систем и естественных барьеров организма работников (кожных покровов, слизистых оболочек и т.п.) поскольку на отдельных рабочих местах присутствуют неустраняемые вредные (опасные) факторы, в отношении которых невозможно обеспечить стабильное соблюдение гигиенических норм и требований.

Очевидно, что при наличии дефицита контингента рабочих специальностей и необходимости сохранения его трудового потенциала рациональная организация питания приобретает особую актуальность для представителей одной из наиболее массовых рабочих профессий путевого хозяйства – мастеров пути.

Методология. Структуру, калорийность, ассортимент продуктов, включенных в рационы питания путевых рабочих, и нормы выхода готовых блюд исследовали методом расчета (обработки) основных компонентов рационов по меню-раскладкам, с использованием таблицы химического состава Российских пищевых продуктов [13, 15]. Меню-раскладки являются основным документом, планирующим состав рационов пи-

тания организованных групп населения, например, используются в учреждениях учебного, лечебного профиля, воинских подразделениях и прочих профессиональных группах, включая подразделения ремонтно-путевого комплекса, участвующие в проведении ремонтно-путевых работ. Метод расчёта по меню-раскладке является широко апробированным и позволяет получить представление о суточной калорийности питания (поступлении энергии), ее дневном распределении между приемами пищи, а также оценить правильность составления меню-раскладок на предмет их соответствия установленным нормам [15].

В качестве критериев оценки пищевой и биологической ценности рационов применялись показатели, регламентируемые физиологическими нормами [15]: уровни потребления воды, необходимые для поддержания водного баланса организма, потребность в энергии (калорийность) для мужчин трудоспособного возраста (18-64 лет).

Для исследования были выкопированы 42 фактические недельные меню-раскладки за июль и февраль 2024 года. Выборка производилась в вагонах-столовых стационарных полевых колонн путевых машинных станций, работающих в трех геоклиматических зонах – на полигонах Дальневосточной (ДВОСТ), Западно-Сибирской (ЗСИБ) и Московской (МСК) железных дорог, численность монтеров пути, получавших питание по анализируемым меню-раскладкам в июле (феврале), соответственно, составила: ДВОСТ – 120 (70) чел., ЗСИБ – 80 (40) чел., МСК – 80 (40) чел., в целом 430 человек.

Цель исследования: изучение качественного состава пищевого рациона, особенностей организации питания железнодорожников, деятельность которых связана с текущим содержанием и ремонтом пути. Разработка рекомендаций по оптимизации питания, направленных на повышение адаптационного потенциала работников к неблагоприятным факторам производственной среды.

Результаты. На сегодняшний день персоналу, занятому ремонтно-путевыми работами, государством гарантируется предоставление бесплатного рациона питания за счет средств работодателя при выполнении на объектах железнодорожной инфраструктуры следующих видов работ:

- аварийном восстановлении верхнего строения пути при сходах подвижного состава, крушениях, авариях, особых случаях брака в работе;
- связанных с ликвидацией разрушительных природно-антропогенных явлений, чрезвычайных ситуаций и их последствий (снежных лавин, селей, оползней, обвалов, наводнений, подмывов земляного полотна и т.д.);
- по реконструкции и ремонту объектов инфраструктуры (земляные и шпалобалластные работы, операции по укладке рельсошпальной решетки и стрелочных переводов и т.д.);

- по ликвидации снежных заносов («снегоборьбе»), очистке железнодорожных путей и стрелочных переводов от снега [16, 17].

Во всех указанных случаях организация питания осуществляется при условии, что технологические операции длятся свыше четырех часов подряд и производятся в режиме закрытого перегона (в «окно»), то есть при остановке движения поездов на фронте производства работ [16, 17].

Качество продукции, используемой для включения в рацион питания железнодорожников ремонтно-путевого комплекса, должно соответствовать действующим нормативным документам [18-22] и обеспечивать:

- полноценный и разнообразный рацион питания необходимой калорийности с оптимальным балансом питательных веществ;
- учет энергетической ценности питания по группам физического труда;
- смену калорийности питания с учетом фактора сезонности и режима питания.

Питание работников ОАО «РЖД» организуется в соответствии с Нормами [15], являющимися научной базой для планирования состава рационов питания в организованных группах населения, в том числе профессиональных коллективах. Нормы учитывают и отражают наиболее рациональные потребности указанных групп населения в энергетической ценности питания и пищевых веществах. Рацион питания составляется на основе дифференцированных и усредненных норм потребления основных макронутриентов или пищевых веществ (белков, жиров и углеводов), в основу дифференциации норм положены половозрастные характеристики населения и группы интенсивности труда работников.

Потребность в суточных энергозатратах и макронутриентах находится в прямой зависимости от принадлежности работника к профессиональной группе, а значит зависит от уровня физической нагрузки человека и характеризуется коэффициентом физической активности (КФА), который коррелирует с антропометрическими данными (масса тела), полом и возрастом [15].

Распределение категорий работников, занятых на железной дороге, с учетом величины суточных энергозатрат и физической активности, необходимых для выполнения трудовых функций в соответствии с должностной инструкцией приведено в таблице 1.

В соответствии с профессиональной принадлежностью и выполняемым служебным функционалом монтеры пути относятся к категории работников тяжелого физического труда, что соответствует наивысшей степени интенсивности трудового процесса (IV группа) и характеризуется высокой долей ручных немеханизированных операций, коэффициент физической активности 2,2 указывает на высокую энергозатратность выполняемых работ и необходимость компенсации

расхода энергии (калорий) рабочих на уровне не ниже 3600-3850 ккал/сутки.

Режимы питания путевых рабочих зависят от режима труда. По данным исследования рабочие, занятые в дневные смены, получают 3-х разовое питание. Распределение фактического суточного рациона относительно стабильно и в разрезе приемов пищи представлено следующими соотношениями от общего объема суточной потребности в пищевых веществах и энергии: на долю завтрака и ужина приходится 30-40% соответственно; обеденная квота равна 35-45%. Промежутки между приемами пищи не превышают 3-4 часов, ужин выдается не позднее, чем за 2-3 часа до отхода к ночному отдыху (ночному сну).

В современных условиях, когда путевые рабочие осуществляют ремонт инфраструктуры в круглосуточном и круглогодичном режимах, особое значение приобретает обеспечение качественно-состава рациона питания, его биологической и энергетической полноценности вне зависимости от времени суток и времени года.

Суточная норма пайков при трехразовом питании распределяется по калорийности в летний и зимний периоды по геоклиматическим зонам в среднем в пределах:

- Дальневосточная 3921 ккал/сут. и 3853 ккал/сут.;
- Западно-Сибирская 3866 ккал/сут. и 3919 ккал/сут.;
- Московская 3610 ккал/сут. и 3300 ккал/сут.

Таблица 1 – Физиологические нормы потребления энергии и макронутриентов для железнодорожников в разрезе профессиональных групп

Профессиональная группа	Группа интенсивности труда	КФА	Физиологическая потребность			
			Энергия, ккал	Белок, г	Жиры, г	Углеводы, г
Работники физического труда (средней тяжести, тяжелого)						
Работники ручного немеханизированного труда	IV	2,2	3600-3850	102-108	120-128	528-566
Работники механизированного труда и операторы, управляющие машинами и механизмами	III	1,9	3150-3300	89-94	105-110	462-484
Работники умственного и легкого физического труда						
Работники легкого труда (специалисты-учетчики, административно-распределительный персонал, сигнальщики и др. профессии, не связанные с физическим трудом)	II	1,6	2650-2800	77-80	88-93	387-411
Работники умственного труда (административно-управленческий персонал, инженерно-технические работники, работники подразделений учета и планирования, секретариат, диспетчерский аппарат)	I	1,4	2100-2450	65-72	70-81	257-289

Обсуждение. Результаты исследования энергетической ценности суточных рационов питания обследуемого контингента показали, что калорийность пайков не зависит от периода года, в большинстве случаев в летний и зимний сезоны года находится в пределах физиологических потребностей, рекомендованных для IV группы интенсивности труда.

В отдельные дни по Западно-Сибирской и Дальневосточной зонам зафиксировано превышение калорийности рациона в диапазоне 800-1200 ккал/сут., с учетом преобладания трехразового питания и большой калорийности рациона, данные факты требуют внимания. Например, установлено, что обед содержал 1600-1900 ккал, при этом известно, что единовременное потребление такого большого количества пищи за один прием значительно снижает усвояемость пищевых веществ организмом, в связи с чем будет обоснованным решение либо о приведении калорийности суточного рациона к норме, либо организация четырехразового питания рабочих. По Московской зоне, наоборот, установлено, что в зимний период года суточная калорийность питания в среднем составляет 3300 ккал, что ниже физиологических потребностей путевых рабочих.

Изучение характера питания в столовых показало достаточное разнообразие блюд в течение

дня. Среди недостатков следует отметить крайне ограниченное включение в ежедневный рацион рыбных, молочных, кисломолочных продуктов, отсутствие витаминизации готовых блюд, недостаточное количество витаминизированных напитков (плодово-ягодных киселей), минеральных напитков. Отмечено однообразие гарниров, в меню преобладают крупы, макаронные изделия, низкая удельная доля овощей (за исключением картофеля).

При комплектации рационов питания и составлении меню используются нормы выхода готовых блюд для исследуемой профессиональной группы – (в граммах) согласно таблице 2, структура суточного рациона питания по калорийности при работе в ночную смену по отдельным приемам пищи (табл. 3). Меню формируются в зависимости от состава завезенных продуктов, а не наоборот.

Для рабочих, занятых в ночные смены, оптимальным считается четырехразовый прием пищи, в ночные часы интенсивность работы всех функциональных систем организма замедляется, в связи с этим увеличение частоты приемов пищи позволяет уменьшить объем и калорийность единовременного потребления нутриентов, что повышает усвояемость пищевых веществ организмом и вместе с тем позволяет поддерживать необходимый уровень энергии и работоспособности на протяжении ночной смены.

Таблица 2 – Нормы выхода готовых блюд

4 группа интенсивности труда, в.т.ч. по геоклиматическим зонам	Салаты (грамм)	1 блюда (грамм)	2 блюда (грамм)	Гарниры / соусы (грамм)	Напитки (грамм)
ДВОСТ	100	250-500	75-100	200/50	200
ЗСИБ	100	400	75-115	150-200/40	400
МСК	100	400-500	75-100	150-200/50	200

Таблица 3 – Структура суточного рациона питания по калорийности при работе в ночную смену по отдельным приемам пищи

Приемы пищи	4 группа интенсивности труда, в.т.ч. по геоклиматическим зонам:					
	ДВОСТ		ЗСИБ		МСК	
	ккал	%	ккал	%	ккал	%
Для ночных смен, всего (ккал.), в т.ч.:	3778	100	3786	100	3320	100
Завтрак	1098	29	1174	31	830	25
Обед	1192	32	1258	33	990	30
Ужин (перед началом работы)	889	23	739	20	784	24
Ужин (в середине ночной смены)*	599	16	615	16	716	21

* – сухой паек

Рациональное распределение энергетической ценности суточного рациона питания для контингента, привлекаемого в ночные смены, в разрезе приемов пищи принимает следующие соотношения: на долю завтрака приходится 25%; на обед и ужин (перед началом смены) по 30% соответственно; квота второго ужина (в середине ночной смены) 15%. Однако, доставка горячей пищи в ночное время организуется не на всех дорогах, т.к. не все столовые, обслуживающие работников ремонтно-путевого комплекса, поддерживают круглосуточный режим работы, в результате чего, бригады монтеров пути обеспечиваются в лучшем случае сухими пайками. У представителей исследуемой профессиональной группы, занятых в ночные смены, в отдельных случаях происходит нарушение режима питания в ночное время.

По данным Центральной дирекции по ремонту пути соотношение между ночными и дневными сменами по сети железных дорог выглядит как 30/70, на 30% ночных смен приходится 70% дневных. Доля работ, производимых в ночное время, зависит от графика движения поездов и, как следствие, от предоставления технологических «окон». В Московском транспортном узле с учетом массовости пригородного движения, особенно в будние дни, возможность предоставления «окон» имеется только в ночной период времени, мелкий ремонт верхнего строения пути осуществляется в рамках 4-х часовых технологических «створов», массовые работы – в выходные дни. Организационно-штатная структура путевых машинных станций не предусматривает сменный (вахтовый) режим работы бригад, не позволяет обеспечить соответствующую технологическую численность контингента на предприятиях, ежедневно работающих преимущественно в ночной период времени, вследствие чего возникают риски привлечения путевых рабочих в течение двух смен подряд, что вступает в противоречие с трудовым законо-

дательством [23] и влечет за собой риски нарушения режимов труда и отдыха, как следствие, питания.

Следует отметить, что у работников путевых машинных станций, занятых на перегонах ремонтом и реконструкцией действующих объектов инфраструктуры, возведением новых железнодорожных магистралей создаются комфортные и благоприятные условия в сфере обеспечения питьевого режима, в том числе к местам проведения работ организуется доставка питьевой воды в пищевых цистернах, производится выдача бутилированной воды в соответствии с действующими гигиеническими нормативами и рекомендациями Роспотребнадзора [15] в объеме не менее 2 литров воды в день на человека. Создание таких условий для монтеров пути особенно актуально в период повышенных температур наружного воздуха, когда работники тяжелого физического труда испытывают повышенные термические нагрузки, работая на открытых площадках, без возможности укрыться от палящего солнца и зноя, что может приводить к перегреванию организма.

Выводы. Для работников тяжелого физического труда, особенно работников ночных смен рациональный режим приема пищи в рабочее время является важным мероприятием по профилактике и предупреждению повышенной утомляемости, заболеваемости со стороны желудочно-кишечного тракта, способствует повышению сопротивляемости организма, эффективной адаптации к ночному труду, неблагоприятным метео- и климатическим условиям.

Бригады монтеров пути часто работают круглосуточно, в ночное время потребность в питании удовлетворяется сухими пайками. В качестве мер по поддержанию работоспособности персонала в ночное время рекомендуется заменить сухие пайки горячими комплексными ужинами или выдавать работникам наборы питания в виде готовых блюд в упаковке, укомплектованные разогревающим

элементом (устройством для подогрева готовых блюд). Также для работников, занятых в ночные смены, актуальна рационализация питьевого режима путем включения в вечерний прием пищи (ужин, получаемый рабочими в ночное время), горячих тонизирующих (бодрящих) напитков (крепких кофе, чая, какао).

Калорийность суточных рационов, нормы выхода и потребления готовых блюд в целом соответствуют физиологическим потребностям в энергии (калориях) и объемах, необходимых для работников IV группы интенсивности труда. Исключение составляет недостаточность калорийности питания путевых рабочих в зимний период года в московском регионе, где дефицит энергетической ценности пайков в среднем составляет 300 ккал./сут., что требует внимания. Необходимость повышения калорийности питания путевых рабочих в зимние месяцы, особенно в суровых условиях Сибири и Дальнего Востока, связана с акклиматизацией к пониженным температурам и повышением уровня обмена на 20-25%, при этом дополнительными факторами увеличения энергозатрат служат необходимость использования тяжелой спецодежды, затрудняющей движения, сложность передвижения по снегу. Исходя из того, что суточная потребность в калориях и пищевых веществах для рабочих IV группы интенсивности труда должна составлять не менее 3600 ккал/сут., а для регионов с экстремальными климатическими условиями не менее 3900 ккал/сут., рекомендуется при составлении рационов питания путевых рабочих поддерживать суточную калорийность в пределах установленных норм, например, разнообразить состав меню, дополнив новыми позициями и/или регулировать весовые показатели готовых блюд. Среднюю величину суточной калорийности рационов питания путевых рабочих, занятых в московском регионе, необходимо увеличивать на 10%.

Изучение меню-раскладок летнего и зимнего периодов показало, что набор продуктов, входящих в состав суточных рационов, типичен для различных геоклиматических зон и сезонов года, нормы выхода готовых блюд также существенных различий не имеют. Рекомендуется разнообразить гарниры, включив в меню овощи, особенно в летнее время, добавить витаминизацию готовых блюд (зеленый лук, петрушка, укроп), расширить перечень напитков витаминизированными (соками, морсами, компотами, плодово-ягодными отварами, киселями, быстрорастворимыми напитками) и минеральными составами (столовыми минеральными водами), при приготовлении пищи и в качестве столовой соли использовать йодированную поваренную соль.

Кроме того, в условиях работ на перегонах и удаленности от санитарно-гигиенических пунктов рабочие часто вынуждены принимать пищу в «полевых» условиях, на месте осуществления работ, в связи с чем возникает непосредственный кон-

такт с биологическим фактором, т.к. отсутствуют надлежащие санитарно-гигиенические условия для приема пищи, что приводит к рискам возникновения заболеваний желудочно-кишечного тракта, пищевых расстройств. Рекомендуется обеспечить работников специализированными средствами для обработки и дезинфекции поверхностей рук, для защиты кожи от биологически вредных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Питание как фактор профилактики преждевременного старения лиц, работающих в сложных условиях труда / М.Ю. Трошина, Л.Ю. Варавина, С.Г. Горелик, Л.В. Колпина // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 2-1. – С. 181-185. – EDN PUUJWX.
2. Трошина, М.Ю. Рациональное питание как средство профилактики заболеваний, ассоциированных с преждевременным старением работников железнодорожного транспорта, непосредственно связанных с безопасностью движения / М.Ю. Трошина, С.Г. Горелик, Л.В. Колпина // *Вестник новых медицинских технологий*. – 2013. – Т. 20, № 2. – С. 361-364. – EDN QZFCV.
3. Трихина, В.В. Разработка программы и методических рекомендаций для коррекции питания рабочих металлургических предприятий / В.В. Трихина, Е.Л. Лазаревич, А.А. Вековцев // *Техника и технология пищевых производств*. – 2015. – № 1(36). – С. 97-102. – EDN TLPWHP.
4. Кобелькова, И.В. Режим питания в сохранении здоровья работающего населения / Кобелькова И.В., Мартинчик А.Н., Кудрявцева К.В., Батулин А.К. // *Вопр. питания*. – 2017. – Т. 86. – № 5. – С. 17-21.
5. Мастерова, С.Н. Экономический аспект важности сбалансированного питания: снижение нагрузки на здравоохранение / С.Н. Мастерова // *Устойчивость демографического развития: детерминанты и ресурсы: Сборник научных статей*. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2024. – С. 590-598. – DOI 10.17059/udf-2024-6-2. – EDN ITBGLG.
6. Пименова, Ю.В. Анализ производственного травматизма работников ремонтно-путевого комплекса / Ю.В. Пименова, Е.О. Латынин, О.С. Сачкова // *Проблемы безопасности российского общества*. – 2024. – № 2(46). – С. 8-17. – EDN GJKROA.
7. Васюкова, О.А. Анализ условий труда путевых рабочих железнодорожного транспорта / О.А. Васюкова, М.В. Капустина, Ю.В. Пименова // *Проблемы безопасности российского общества*. – 2023. – № 4(44). – С. 8-13. – EDN OCHLSK.
8. Пименова, Ю.В. Изучение вредных и опасных факторов условий труда монтеров пути / Ю.В. Пименова, Д.О. Капустина, Д.А. Райлян // *Проблемы безопасности российского общества*. – 2023. – № 4(44). – С. 14-20. – EDN OAMLZM.
9. Пименова, Ю.В. Гигиеническая оценка условий труда и профессиональной заболеваемости работников ремонтно-путевого комплекса / Ю.В. Пименова, О.С. Сачкова // *Проблемы безопасности российского общества*. – 2024. – № 3(47). – С. 24-38. – EDN LAFHUC.
10. Пименова, Ю.В. Анализ санитарно-гигиенических и бытовых условий монтеров пути путевых машинных станций при работах, выполняемых в режиме закрытого перегона / Ю.В. Пименова, И.А. Поединцев, О.С. Сачкова // *Проблемы безопасности российского общества*. – 2024. – № 1(45). – С. 22-28. – EDN NMWRPG.
11. Сачкова, О.С. Прогнозирование и анализ профессиональных рисков у работников путевого хозяйства, связанных с условиями труда / О.С. Сачкова, Ю.В. Пименова, Л.Н. Кошель // *Наука и техника транспорта*. – 2024. – № 3. – С. 76-82. – EDN UMPRFK.
12. Тутельян В.А., Никитюк Д.Б., Батулин А.К., Васильев А.В., Гаппаров М.М.Г., Жилинская Н.В., Жминченко В.М., Камбаров А.О., Коденцова В.М., Кравченко Л.В., Кулакова С.Н., Лашнева Н.В., Мазо В.К., Соколов А.И., Суханов Б.П., Хотимченко С.А. // *Нутриом как направление «главного удара»: определение физиологических потребностей в*

макро- и микронутриентах, минорных биологически активных веществах пищи // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, №4. – С. 24-34.

13. Химический состав российских пищевых продуктов: Справочник Автор: Под ред. В.А. Тутельяна. Издательство: М.: ДеЛи принт Год: 2002 Страниц: 236.

14. Таблицы калорийности, пищевой ценности и химического состава продуктов питания и готовых блюд: электронный ресурс (режим доступа: <https://health-diet.ru/table/calorie?ysclid=m6j3orwb3u86472661>, дата обращения 30.01.2025).

15. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 "Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации" (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.).

16. Коллективный договор открытого акционерного общества "Российские железные дороги" на 2023-2025 годы (утв. распоряжением ОАО "РЖД" от 26 декабря 2022 г. N 3446).

17. Федеральный закон от 19.12.2022 N 524-ФЗ "О внесении изменения в статью 25 Федерального закона "О железнодорожном транспорте в Российской Федерации".

18. Федеральный закон от 27.12.2002 г. 184-ФЗ «О техническом регулировании».

19. Федеральный закон от 23.12.1999 г. N2 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов».

20. Федеральный закон от 12.03.1999г. N2 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

21. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31984-2012 «Услуги общественного питания. Общие требования» (дата введения – 01.01.2015 г.)

22. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31985-2013 «Услуги общественного питания. Термины и определения» (дата введения – 01.01.2015г.)

23. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ – Редакция от 28.12.2024, Статья 103. Сменная работа.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 614.84

EDN: PNOOCT

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРОВОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ПОЖАРНОГО РИСКА НА ТЕРРИТОРИЯХ ВБЛИЗИ ВЛ-0,4 КВ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8371-6090

AuthorID: 879032

ORCID: 0009-0006-6502-5921

КОЗЛОВА Юлия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент политехнической школы*Югорский государственный университет**(628012, Россия, Ханты-Мансийск, улица Чехова, 16, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru)*

Аннотация. Процесс проведения судебной пожарно-технической экспертизы завершается подготовкой заключения эксперта, которое влияет на весь ход расследования пожара. Особенностью экспертизы является необходимость проведения комплексных инженерных расчетов, позволяющих устанавливать причинно-следственные связи между событиями и явлениями, что на практике не всегда реализуется в полной мере. Большую значимость имеет использование экспертами актуальных источников информации, а также расчетных методик для повышения доказательственного значения и надежности заключений. В статье приводится информация о ряде экспертных заключений, в которых в качестве причины пожара необоснованно указывается возникновение источника зажигания, образовавшегося по причине схлестывания проводов воздушной линии электропередачи. Исследование параметров линии напряжением 0,4 кВ, фигурирующей в одном из экспертных заключений по пожару, позволило провести теоретическое, расчетное и экспериментальное обоснование невозможности схлестывания при анализируемых условиях эксплуатации. Полученные расчетные зависимости, позволяющие оценить возможность схлестывания фазного и нулевого проводов низковольтных ВЛ в зависимости от стрел провеса и расстояния между проводами, тем самым определив причастность ВЛ к возникновению пожара, могут быть использованы для комплексного анализа объектов электроэнергетики при производстве пожарно-технической экспертизы.

Ключевые слова: пожарная безопасность, экспертиза пожаров, воздушные линии электропередачи, схлестывание проводов, ветровая нагрузка, источник зажигания, заключение эксперта, пожарный риск, отклонение провода, расчетный метод.

**DETERMINATION OF THE POSSIBILITY OF WIRE CROSS-WHIPPING TO ASSESS
THE FIRE RISK ON THE AREAS NEAR OVERHEAD TRANSMISSION LINES 0.4 KV**

© The Author(s) 2025

KOZLOVA Yulia Sergeevna, candidate of technical sciences, associate professor of Polytechnic Department*Yugra State University**(628012, Russia, Khanty-Mansiysk, street Chehova 16, e-mail: y_kozlova@ugrasu.ru)*

Abstract. The process of conducting a forensic fire technical examination is completed by preparing an expert opinion, which affects the entire course of the fire investigation. A special feature of the examination is the need for complex engineering calculations to establish cause-and-effect relationships between events and phenomena, which in practice is not always fully realized. Of great importance is the use by experts of up-to-date sources of information, as well as computational methods to increase the evidentiary value and reliability of conclusions. The article provides information on a number of expert opinions, which unreasonably indicate the occurrence of an ignition source due to the clipping of overhead power line wires as the cause of the fire. The study of the parameters of the 0.4 kV line, which appears in one of the expert opinions on fire, allowed for theoretical, computational and experimental justification of the impossibility of collapse under the analyzed operating conditions. The calculated dependences obtained, which make it possible to assess the possibility of the phase and zero wires of low-voltage overhead lines clashing depending on the sag arrows and the distance between the wires, thereby determining the involvement of overhead lines in a fire, can be used for a comprehensive analysis of electric power facilities in the production of fire and technical expertise.

Keywords: fire safety, examination of fires, overhead transmission lines, cross-whipping, gust loading, ignition source, expert's report, fire risk, wire warping, computational method.

Для цитирования: Козлова Ю.С. Определение возможности схлестывания проводов для оценки пожарного риска на территориях вблизи ВЛ-0,4 кВ / Ю.С. Козлова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 217-222. – EDN: PNOOCT.

Введение. Одним из наиболее сложных направлений деятельности сотрудников государственного пожарного надзора является проведение расследования по делам о преступлениях, связан-

ных с пожаром. От правильности формулировки вывода относительно очага пожара зависит направление дальнейших действий дознавателя и следователя, от точности установления причины

– правильность квалификации деяния, определения круга виновных и степень их ответственности [1-8]. Несмотря на достаточно высокий уровень существующих научных исследований в области экспертизы пожаров при расследовании пожаров, в условиях уничтожения пожаром материальных следов пожарно-технические эксперты не всегда могут прийти к однозначному выводу об обстоятельствах возникновения пожара и, зачастую, вынуждены формулировать вывод в вероятностной форме [9-13]. Такое положение дел в ряде случаев приводит к ошибкам в принятии решения при расследовании: не устанавливаются или ошибочно устанавливаются виновники пожаров.

Анализ ряда заключений по результатам пожарно-технических экспертиз, проведенных экспертами сектора судебных экспертиз испытательных пожарных лабораторий, по пожарам на территориях, где размещены воздушные линии электропередачи (далее – ВЛ) низкого и среднего напряжения, позволил установить, что в качестве причины возникновения пожара указывается воздействие на горючие растительные материалы частиц металла, образовавшихся при протекании коротких замыканий проводов ВЛ (предположительно при схлестывании проводов при порывах ветра), однако возможность схлестывания проводов, исходя из их взаимного расположения, и удаленность ВЛ от очага пожара не оценивается. Вывод о причине пожара формулируется на основе материалов протокола осмотра места пожара, протоколов допроса свидетелей и иных данных.

Как известно, заключение эксперта является одним из наиболее весомых доказательств в уголовном судопроизводстве [14-17]. В большинстве случаев заключение становится основой для определения круга виновных лиц – к ответственности привлекаются лица, на которых лежит обязанность по организации и соблюдению требований пожарной безопасности при эксплуатации воздушной линии. Так, в 2023 г. электросетевая компания, столкнувшись с обвинением по делу о пожаре, инициировала исследование специалистами возможности схлестывания проводов конкретной ВЛ напряжением 0,4 кВ, результаты которого частично изложены в данной статье.

Представленные результаты позволят более точно анализировать связь между ВЛ и их причастностью к возникновению пожаров, тем самым помогая оценивать пожарные риски на территориях, расположенных вблизи объектов электроэнергетики.

Методология. Известно, что реализация пожарной опасности невозможна без источника зажигания. Целью данной статьи является исследование возможности схлестывания проводов ВЛ с заданными параметрами для использования результатов при определении причастности ВЛ к образованию источника зажигания. Выбор ситуа-

ции для исследования обоснован тем обстоятельством, что схлестывание проводов зачастую указывается в экспертных заключениях испытательной пожарной лаборатории в качестве вероятной причины возникновения источника зажигания, причем основанием этого является лишь факт наличия ВЛ вблизи предполагаемого очага пожара, безотносительно учета взаимного расположения проводов в пролете, их состояния и соответствующих расчетов.

Исследование состояло из трех частей: теоретической, расчетной и экспериментальной. Методика исследования включала в себя:

- изучение и анализ научно-технической литературы, научных публикаций, нормативных документов в части поставленного вопроса – определение существующих требований к рассматриваемому объекту и анализ соответствия его этим требованиям;

- проведение расчетов на основе физических законов;

- реализация комплекса натурных испытаний – проведение испытаний ВЛ на возможность соприкосновения фазного и нулевого проводов, расположенных в одной вертикальной плоскости (оценка возможности схлестывания проводов, расположенных в одной горизонтальной плоскости, подробно представлено в [18]), исходя из их геометрического положения, с использованием поверенного оборудования на полигоне научно-технического центра Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы на макете ВЛ 0,4 кВ, выполненном в точном соответствии с анализируемой линией электропередачи 0,4 кВ.

Контроль геометрических параметров макета ВЛ фиксировался до начала проведения эксперимента с оформлением соответствующих схем протокола испытаний. Для моделирования воздействия ветра в месте проведения эксперимента по центру смонтированных пролетов устанавливалась вентиляторная установка, позволяющая создать горизонтально направленный воздушный поток на высоте от 0 до 8 метров скоростью до 20 м/с. Вентиляторная установка расположена таким образом, чтобы создаваемый ею воздушный поток был аналогичен порывам ветра, зафиксированным метеослужбой в период возникновения пожара.

Опыты на макете ВЛ проводились в следующем порядке: фиксировалась температура окружающей среды (температурные условия во время экспериментов были близки к условиям в день пожара), подавалось напряжение на ТП-10/0,4, осуществлялось моделирование переменной ветровой нагрузки с применением вентиляторной установки с изменением скорости ветра каждые 30 с в течение 5 мин от 6 м/с до 14 м/с и фиксацией скорости ветра с применением анемометра. По истечении 5 минут проведения опыта напряжение с ТП-10/0,4 кВ снималось.

Результаты. Перед специалистами была поставлена задача проанализировать моделируемую ситуацию: имеется линия электропередачи напряжением 0,4 кВ, выполненная в неизолированном алюминиевом проводе А-35 на высоте 6-7 метров

с кабельной вставкой от трансформаторной подстанции. Линия имеет четыре провода: нулевой и три фазных: № 1, №2 и №3, которые закреплены на опорах и натянуты согласно прилагаемой схеме (рис. 1).

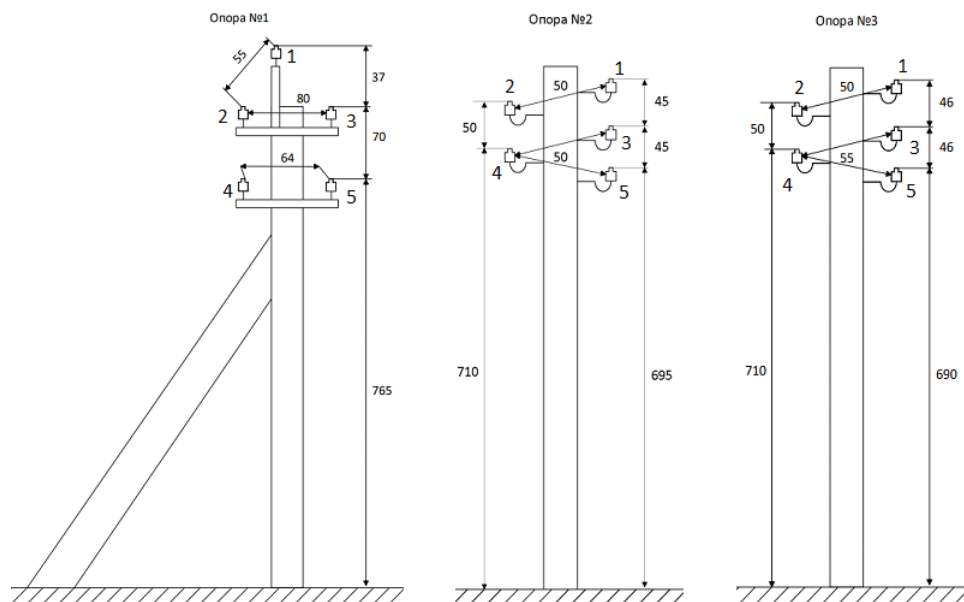


Рисунок 1 – Схема крепления проводов:

1 – фазный провод №1; 2 – фазный провод №2; 3 – фазный провод №3; 4 – нулевой провод;
5 – провод фонарный (обозначенные расстояния указаны в см)

Между опорами №1 и №2 стрела провеса равна 0,46 м, расстояние между проводами – от 0,5 до 0,7 м. Между опорами №2 и №3 стрела провеса составляет 0,96 м, расстояние между проводами – 0,5 м.

Дополнительно имеется кабельная вставка от трансформаторной подстанции до опоры 1 общей протяженностью около 25 метров, тип кабеля – ВВГ 3х16 мм². Моделируется участок сети, расположенный между опорами №1-3:

- расстояние от опоры №1 до трансформаторной подстанции – 19 метров;
- расстояние от опоры №1 до опоры №2 – 26,4 метра;
- расстояние от опоры №2 до опоры №3 – 42,4 метра;

Линия выполнена с учетом требований, установленных ПУЭ, что подтверждается результатами технического освидетельствования, проведенного с участием представителей Ростехнадзора.

По результатам анализа специалистам необходимо было дать ответы на поставленные вопросы, среди которых основным являлся вопрос о возможности схлестывания в моделируемой ситуации нулевого и фазного провода №2 от ветра со средним направлением в диапазоне 189-204 градуса по данным розы ветров в день пожара, средней скоростью 6 м/с и порывами до 14 м/с (условия, которые фиксировались в день пожара).

В соответствии с п. 2.4.5 Правил устройства

электроустановок [19] механический расчет элементов ВЛ напряжением до 1 кВ должен производиться по методам, изложенным в гл. 2.5. Согласно данной главе, при расчете ВЛ и их элементов должны учитываться климатические условия – ветровое давление, толщина стенки гололеда, температура воздуха, степень агрессивного воздействия окружающей среды, интенсивность грозовой деятельности, пляска проводов и тросов, вибрация. Определение расчетных условий по ветру должно производиться на основании соответствующих карт климатического районирования территории РФ [1].

Согласно данным требованиям, в моделируемой ситуации нормативное ветровое давление W_0 , Па (скорость ветра v_0 , м/с) для рассматриваемой области принимается равным 400 Па (25 м/с).

Согласно моделируемой ситуации, ВЛ выполнена с учетом требований, установленных [19], что подтверждается результатами технического освидетельствования, как указано выше. При таких обстоятельствах схлестывание проводов линии от ветра, имеющего силу менее 25 м/с, невозможно, так как сила ветра ниже нормативного ветрового давления линии.

Однако, данный вывод следует проверить физическими расчетами, т.к. номинальное соответствие объекта требованиям нормативных документов не всегда гарантирует безопасную эксплуатацию (ввиду, например, несоответствия существующих

ветровых нагрузок тем, которые разработаны в 50-70-е годы и положены в основу нормирования).

Учитывая, что провода могут перемещаться в пространстве под воздействием физических сил (сила тяжести, сила давления ветра, сила натяжения провода), а, согласно моделируемой ситуации, фазный провод №2 находится над нулевым проводом, то существует два варианта схлестывания проводов:

- при поступательном перемещении нулевого провода горизонтально вверх на высоту, равную расстоянию между нулевым и фазным проводом;
- при вращательном движении нулевого провода с осью вращения, проходящей через точки крепления провода на опорах ВЛ, на высоту, равную расстоянию между нулевым и фазным проводом.

Поступательное перемещение нулевого провода горизонтально вверх на высоту, равную расстоянию между нулевым и фазным проводом, невозможно в силу близкого расположения проводов к земле на равнинной местности, где ветер имеет горизонтальное направление и потоки воздуха, направленные вертикально вверх, отсутствуют.

Для проверки вывода о возможности соприкосновения проводов от вращательного движения необходимо провести физический расчет статического равновесия провода, отклонившегося на угол α от положения равновесия в условиях ветреной погоды, при воздействии на него трех сил: силы тяжести $\vec{P}$, силы давления ветра $\vec{F}_в$ и силы натяжения нити $\vec{T}$ (рис. 2).

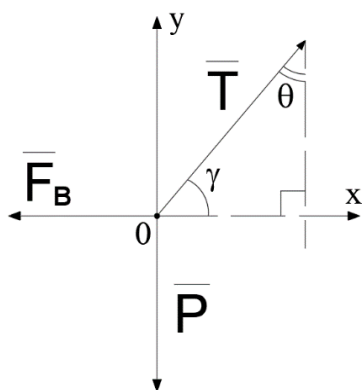


Рисунок 2 – Силы, действующие на провод ВЛ

Моделируя движения проводов в пространстве, можно установить, что угол, на который должен подняться нулевой провод для соприкосновения с фазным проводом №2, будет минимальным только в случае, если система проводов придет в конфигурацию, представленную ниже (рис. 3).

Расчет критического угла схлестывания может быть осуществлен по формулам:

$$\cos(\theta_{кр}) \cdot f + \frac{h}{2} = 0, \quad (1)$$

$$\theta_{кр} = \arccos\left(-\frac{h}{f \cdot 2}\right), \quad (2)$$

где f – стрела провеса провода;

h – расстояние между проводами.

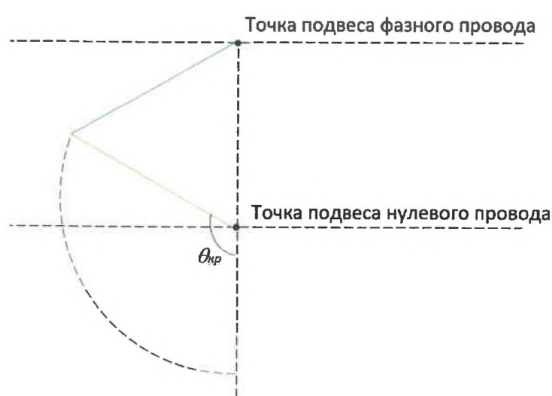


Рисунок 3 – Конфигурация системы проводов, при которой возможно их соприкосновение при минимальном угле отклонения нулевого провода от вертикальной оси

Тогда угол отклонения нулевого провода от вертикальной оси между опорами №1 и №2 составит:

$$\theta_{кр12} = \arccos\left(-\frac{h_{12}}{f_{12} \cdot 2}\right) = \arccos\left(-\frac{0,6}{0,46 \cdot 2}\right) = 130,7^\circ.$$

Между опорами №2 и №3:

$$\theta_{кр23} = \arccos\left(-\frac{h_{23}}{f_{23} \cdot 2}\right) = \arccos\left(-\frac{0,5}{0,96 \cdot 2}\right) = 105,1^\circ.$$

Данное положение системы представляется маловероятным, т.к. фазный и нулевой провода имеют разные отклонения от вертикальной оси несмотря на то, что на них действуют одни и те же силы.

Учитывая, что во всех иных конфигурациях системы проводов для их соприкосновения требуется больший угол отклонения нулевого провода, т.е. существенно большая сила ветра, то при расчете рассматривалась указанная на рисунке №3 конфигурация, несмотря на ее крайне малую вероятность.

Для получения наиболее достоверного расчета направления силы давления ветра принято перпендикулярно проводам, что будет соответствовать наихудшему случаю для схлестывания проводов ВЛ.

Условие статического равновесия выражается формулой:

$$\vec{P} + \vec{F}_в + \vec{T} = 0. \quad (3)$$

Рассчитаем модули векторов силы тяжести $\vec{P}$ и силы давления ветра $\vec{F}_в$ при скорости ветра $v=14$ м/с. Длину провода принимается равной длине пролёта в силу малого их отличия: $L=26,4$ м. Погонная масса провода – $m_{пог}=94$ кг/км; ускорение свободного падения Земли – $g=9,807$ м/с².

Модуль силы тяжести определяем по формуле:

$$P = m_{пог} \cdot L \cdot g = 94 \text{ кг/км} \cdot 0,0264 \text{ км} \cdot 9,807 \text{ м/с}^2 = 24,336 \text{ Н}. \quad (4)$$

Площадь провода, на которую воздействует сила давления ветра вычисляется по формуле:

$$S = L \cdot d = 26,4 \text{ м} \cdot 0,0075 \text{ мм} = 24,336 \text{ м}^2, \quad (5)$$

где $d=7,5$ мм – диаметр провода А-35.

Давление ветра связано со скоростью ветра следующим соотношением, упоминаемым в п.2.5.41

[19]:

$$q_v = \frac{v^2}{1,6} = \frac{14^2}{1,6} = 122,5 \text{ Па}, \quad (6)$$

где $v=14$ м/с – скорость ветра согласно исходным данным.

Модуль силы давления ветра:

$$F_b = S \cdot q_v = 0,198 \text{ м}^2 \cdot 122,5 \text{ Па} = 24,255 \text{ Н}. \quad (7)$$

Тогда модуль проекции силы натяжения провода для соблюдения условия равновесия должен равняться:

$$T = \sqrt{F_b^2 + P^2} = \sqrt{24,255^2 + 24,336^2} = 34,359 \text{ Н}. \quad (8)$$

Т.к. сила натяжения провода из физических соображений всегда лежит в плоскости, проходящей через проводник, можем вычислить угол, на который он будет отклонен. При рассмотрении проекции сил на ось абсцисс условие равновесия примет следующий вид:

$$F_b - T \cdot \cos(\gamma) = 0. \quad (9)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{F_b}{T}\right) = \arccos\left(\frac{24,255}{34,359}\right) = 45,1^\circ. \quad (10)$$

Тогда угол отклонения провода от вертикальной оси составит:

$$\theta = 90^\circ - \gamma = 90^\circ - 45,1^\circ = 44,9^\circ. \quad (11)$$

Геометрическая конфигурация расположения проводов представлена на рисунке 4.

Таким образом, при ветре 14 м/с нулевой провод в пролете опор №1 и №2 и в пролете опор №2 и №3 отклонится от вертикальной оси на угол, недостаточный для его соприкосновения с фазным проводом.

Выводы специалистов о невозможности схлестывания проводов при существовавших расположении и стрелах провеса в условиях ветра 14 м/с также подтверждаются экспериментом, про-

веденным с привлечением испытателей научно-технического центра Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы. В рамках указанного эксперимента на провода макетов ВЛ, выполненных в точном соответствии с анализируемой линией электропередачи 0,4 кВ, в технических характеристиках линии, существовавших по состоянию на момент пожара, с помощью ветровой установки создавалась ветровая нагрузка 14 м/с. По результатам 20 проведенных экспериментов (10 опытов для пролета между опорами №2 и №3, 10 – для пролета между опорами №1 и №2) провода ВЛ пришли в еле заметное движение, явно недостаточное для их схлестывания. Ни в одном из опытов схлестывания не наблюдалось. В таблице 1 представлены результаты опытов для пролета между опорами №2 и №3 (результаты для другого пролета аналогичны).

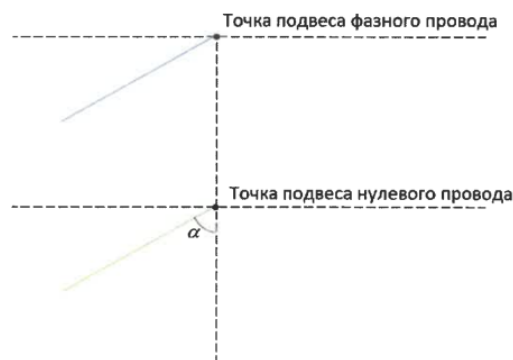


Рисунок 4 – Отклонение провода относительно вертикальной оси при ветре 14 м/с

Таблица 1 – Результаты воздействия ветровой нагрузки на провода пролетов между опорами №2 и №3

№ опыта	Изменения скорости ветра за время опыта, м/с	Максимальная скорость ветра (порывы), м/с	Количество схлестываний
1	0,0 – 6,8 – 14,6 – 6,7 – 13,5 – 7,3 – 15,2 – 5,2 – 13,8 – 6,1 – 0,0	15,2	0
2	0,0 – 6,0 – 14,8 – 5,8 – 15,1 – 6,6 – 14,1 – 5,8 – 13,8 – 5,8 – 13,9 – 0,0	15,1	0
3	0,0 – 12,1 – 14,1 – 5,7 – 14,9 – 5,3 – 13,9 – 5,9 – 15,1 – 6,8 – 14,2 – 5,9 – 0,0	15,1	0
4	0,0 – 5,9 – 14,1 – 6,2 – 14,0 – 5,8 – 14,3 – 5,6 – 13,9 – 6,2 – 14,4 – 5,7 – 0,0	14,4	0
5	0,0 – 6,5 – 14,6 – 4,8 – 15,2 – 5,7 – 14,2 – 6,9 – 14,1 – 7,0 – 15,1 – 4,7 – 0,0	15,2	0
6	0,0 – 14,1 – 6,8 – 14,7 – 6,4 – 13,5 – 5,2 – 14,6 – 6,8 – 15,1 – 6,7 – 0,0	15,1	0
7	0,0 – 14,7 – 5,5 – 14,3 – 5,4 – 14,8 – 5,8 – 14,9 – 4,6 – 13,9 – 6,5 – 0,0	14,9	0
8	0,0 – 14,1 – 6,5 – 13,9 – 6,3 – 14,3 – 5,3 – 14,0 – 4,8 – 13,1 – 4,7 0,0	14,5	0
9	0,0 – 14,2 – 6,0 – 13,8 – 4,1 – 14,1 – 6,6 – 14,2 – 5,3 – 14,5 – 6,5 – 0,0	14,5	0
10	0,0 – 14,3 – 6,4 – 15,0 – 5,6 – 14,1 – 13,8 – 6,5 – 14,0 – 6,3 – 0,0	15,0	0

Обсуждение. Результаты исследований, проведенных различными методами, позволили сформулировать вывод о невозможности схлестывания проводов ВЛ при существующей схеме подвеса проводов. Результаты являются наглядными и обоснованными, т.к. получены с использованием действующих нормативных документов (нормативное обоснование), общепринятых и утвержденных методов расчета (расчет условий схлестывания) и точного воспроизведения реальных условий для физической модели в совокупности с поверенным оборудованием.

Выводы. Обобщая вышеизложенное, необходимо еще раз отметить, что заключение эксперта способно оказывать решающее влияние на весь ход расследования. Однако, как показывает практика, исследования не всегда полны и убедительны, выводы не всегда достаточно аргументированы и определены, а по основному вопросу экспертизы о причине пожара – в них преобладает вероятностная форма. Особенностью пожарно-технической экспертизы является необходимость проведения инженерных расчетов, что затрудняет исследование и делает его в ряде случаев невозможным или

более трудоемким без соответствующих навыков. Данное обстоятельство свидетельствует о значимости применения специальных познаний в области естественных и технических наук, позволяющих в сложной ситуации устанавливать причинно-следственные связи между элементами механизма преступного события. В этой связи возрастает значение использования следствием и дознанием достижений науки и техники, актуальных источников информации, особенно в области пожарно-технической экспертизы, а также использование расчетных методик для повышения доказательственного значения и надежности экспертных заключений. Т.к. большинство низковольтных ВЛ имеют типовое расположение проводов, то результаты, представленные в данной статье, могут быть использованы для осуществления более корректного анализ причастности ВЛ к возникновению пожара, а также позволят оценивать пожарные риски на объектах электросетевого комплекса и прилегающих к ним территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бруевич, М.Ю., Зуев, А.В., Платонов, А.В. Проблемные моменты, подлежащие установлению и доказыванию по преступлениям, связанным с пожаром. Вопросы российского и международного права. – 2022. – Т. 12. – № 7-1. – С. 190-197.
2. Чепракова, В.Р. Применение сценарного анализа при проведении судебной пожарно-технической экспертизы / В.Р. Чепракова, В.В. Плешаков // Академия Государственной противопожарной службы МЧС России: Теория. Инновации. Практика: Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти частях, Москва, 19 октября 2023 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2023. – С. 215-218.
3. Карпов, С.Ю. Особенности организации судебно-экспертной профилактической деятельности пожарнотехнического эксперта / С.Ю. Карпов, А.Я. Понимаскин // Вестник Томского государственного университета. – 2023. – № 495. – С. 205-214. – DOI 10.17223/15617793/495/20.
4. Мокряк, А.Ю., Мокряк, А.В. Исследование металлических и электротехнических объектов судебной пожарно-технической экспертизы / под общей редакцией Б.В. Гавкалюка. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2022. – 212 с.
5. Методы газовой хроматографии и ИК-спектроскопии как инструменты пожарно-технической экспертизы / А.А. Шубин [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2017. – № 3 (6). – С. 22-27.
6. Ильин, П.И. Развитие испытательных пожарных лабораторий в современной России: пожарная охрана на службе государства. 1918-2018 гг.: сб. ст. Уфа: РИК УГАТУ, 2018. – С. 84-88.
7. Теоретические основы решения практических задач автотехнической экспертизы / В.Ф. Гольчевский, Ф.М. Власов, А.А. Несмеянов [и др.]. Том Часть 1. – Иркутск: Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2014. – 204 с.
8. Воронин, М.А. Методы диагностирования механизма возникновения и наступления негативных последствий пожаров / М.А. Воронин, Д.С. Алексеева, В.В. Плешаков // Российский научный вестник. – 2024. – № 1. – С. 125-132.
9. Плешаков, Виталий Владимирович Информационно-аналитическая поддержка принятия решений на первоначальном этапе расследования пожаров: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.10 Москва 2020.
10. Карпов, С.Ю. Особенности подготовки пожарнотехнического эксперта / С.Ю. Карпов, А.Я. Понимаскин // Актуальные проблемы российского права. – 2024. – Т. 19, № 1(158). – С. 155-165. – DOI 10.17803/1994-1471.2024.158.1.155-165.
11. Майлис, Н.П. О необходимости расширения рамок учебного процесса при подготовке судебных экспертов / Н.П. Майлис // Вестник Московского университета МВД России. – 2016. – № 5. – С. 56-59.
12. Несмеянов, А.А. Якоб, А.А. Об актуальности изучения отдельных дисциплин при подготовке специалистов в области инженерно-технических экспертиз / А.А. Несмеянов, А.А. Якоб // Образование и право. – 2021. – № 9. – С. 225-228.
13. Савельева, Н.В., Савельев, В.А. О необходимости повышения уровня профессиональной подготовки экспертов в условиях дифференциации и интеграции научных знаний / Н.В. Савельева, В.А. Савельев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 316-323.
14. Ходикова, Н.А., Плешаков, В.В., Чепракова, В.Р., Малько, В.А. Феномен экспертного мышления и методика его формирования у обучающихся по специальности «Судебная пожарно-техническая экспертиза» // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 1. – С. 122-131.
15. Аверьянова, Т.В. Судебная экспертиза. Курс общей теории: монография. – М.: Норма: Инфра-М, 2022. – 480 с.
16. Расследование и экспертиза пожаров: Учебное пособие / С.А. Назаров, В.В. Плешаков, И.А. Степанова [и др.]. – 1-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 289 с.
17. Чешко, И.Д. Пожарно-техническая экспертиза в системе Федеральной противопожарной службы МЧС России: экспертные специальности, технические возможности, подготовка экспертов / И.Д. Чешко, А.А. Тумановский, М.Ю. Принцева // Судебная экспертиза. – 2019. – № 4(60). – С. 33-41. – DOI 10.25724.
18. Кабашов, В.Ю. Исследование условий возможного схлестывания проводов сельских ВЛ 6-10 кВ / В.Ю. Кабашов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – №2. – С. 9-12.
19. Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2003.

Статья поступила в редакцию 20.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 664.951;331.46

EDN: PHEPZZ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ В ОЦЕНКЕ
ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ ОБРАБОТЧИКОВ РЫБЫ**

© Автор(ы) 2025

ORCID: 0009-0001-7540-0143

РОДИОНОВ Никита Владимирович, аспирант*Калининградский государственный технический университет**(236022, Россия, Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: nick.rodionov556@yandex.ru)*

Аннотация. В статье рассматривается применение байесовской сети для оценки профессионального риска обработчика рыбы на примере вероятности его травмирования – падения в результате поскользывания и пореза руки. Частота реализации опасных событий устанавливалась на основе статистических данных, полученных на действующем предприятии. Отмечается проблема оценки профессиональных рисков с нормативно-правовой точки зрения и предлагается использование метода байесовской сети, как универсального и гибкого инструмента для расчёта вероятности причинения вреда жизни и (или) здоровью работника, что соответствует определению профессионального риска в Трудовом кодексе РФ. В статье проводится расчёт условной вероятности по формуле условной вероятности и с использованием программного обеспечения *Bayes Server*, а также описываются этапы использования данной программы. Целью работы являлось построение байесовской сети для оценки профессиональных рисков на рабочем месте обработчика рыбы. Для достижения цели исследования решались задачи: сбор необходимых данных на предприятии, обработка количественных данных по формуле Байеса, внесение значений и распределение связей между узлами в программном продукте *Bayes Server*. В качестве методологии исследования использовался эмпирический метод для сбора данных, а также математический аппарат. Результатом исследования является построенная байесовская сеть для опасных событий «падение работника» и «порез руки», отражающая причины и факторы, влияющие на их реализацию, и тяжесть последствий. В выводе отмечается преимущество использования метода, в частности возможность прогнозирования рисков (получения прямого вывода) на основе субъективных данных, а также примеры использования материалов, полученных на основе байесовских сетей.

Ключевые слова: профессиональный риск, безопасность труда, байесовская сеть, травмирование работника, рыбообработывающее предприятие, обработчик рыбы.

**USING BAYESIAN NETWORKS TO ASSESS OCCUPATIONAL RISKS
OF FISH PROCESSING WORKERS**

© The Author(s) 2025

RODIONOV Nikita Vladimirovich, post-graduate student*Kaliningrad State Technical University**(236022, Russia, Kaliningrad, Soviet avenue 1, e-mail: nick.rodionov556@yandex.ru)*

Abstract. The article discusses the use of a Bayesian network to assess the occupational risk of a fish handler using the example of the likelihood of injury – a fall as a result of slipping and cutting his hand. The frequency of dangerous events was determined based on statistical data obtained at the operating enterprise. The problem of assessing occupational risks from a regulatory point of view is noted and the use of the Bayesian network method is proposed as a universal and flexible tool for calculating the probability of harm to the life and (or) health of an employee, which corresponds to the definition of occupational risk in the Labor Code of the Russian Federation. The article calculates the conditional probability using the conditional probability formula and using the Bayes Server software, and describes the stages of using this program. The aim of the work was to build a Bayesian network to assess occupational risks at the fish handler's workplace. To achieve the research goal, the following tasks were solved: collecting the necessary data at the enterprise, processing quantitative data using the Bayes formula, entering values and distributing links between nodes in the Bayes Server software product. The research methodology used was an empirical method for data collection, as well as a mathematical apparatus. The result of the study is a built-in Bayesian network for the dangerous events of "employee fall" and "hand cut", reflecting the causes and factors influencing their implementation, and the severity of the consequences. The conclusion notes the advantage of using the method, in particular, the possibility of predicting risks (obtaining a direct conclusion) based on subjective data, as well as examples of using materials obtained on the basis of Bayesian networks.

Keywords: occupational risk, occupational safety, Bayesian network, injury to an employee, fish processing plant, fish handler.

Для цитирования: Родионов Н.В. Использование байесовских сетей в оценке профессиональных рисков обработчиков рыбы / Н.В. Родионов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 223-228. – EDN: PHEPZZ.

Введение. Сохранение жизни и здоровья работников остаётся приоритетной целью для общества и, в частности, для работодателя. Одним из мероприятий, направленным на достижение этой цели, является управление профессиональными рисками, которое включает систематическое выявление опасностей, рисков, их регулярный анализ и оценку. В Трудовом кодексе РФ приводится определение профессионального риска, как вероятность причинения вреда жизни и (или) здоровью работника в результате воздействия на него вредного и (или) опасного производственного фактора при исполнении им своей трудовой функции с учетом возможной тяжести повреждения здоровья [1]. Однако в нормативно-правовых актах в области охраны труда не установлена конкретная единая методика определения такой вероятности. Согласно определению вероятности, как числовой характеристики степени возможности появления какого-либо события [2], оценка профессиональных рисков должна проводиться количественными методами, что является проблемным вопросом. Решению данной проблемы посвящены некоторые научные исследования [3-7], в то время как байесовский подход в основном рассматривался зарубежными авторами для анализа несчастных случаев [8-11], в том числе рассматривались вопросы применения байесовского анализа для оценки риска несмертельных травм моряков [12], моделирования факторов, влияющих на возникновение несчастного случая [13], определения взаимосвязи факторов, влияющих на несчастные случаи на горнодобывающих предприятиях [14].

В рыбообработывающей отрасли показатели травматизма остаются на высоком уровне. По данным Росстата за 2023 год значение коэффициента частоты несчастных случаев, включая со смертельным исходом, при переработке и консервировании рыбы, ракообразных и моллюсков составило 2.2 [15], что в сравнении с другими отраслями экономики находится на повышенном уровне. Деятельность рыбоперерабатывающих предприятий в разрезе условий труда, управления профессиональными рисками изучена не в полной мере. Однако в иностранной литературе содержатся некоторые аспекты условий труда в рыбообработывающей отрасли [16-18]. Обработчики рыбы составляют основную долю рабочих профессий на таких предприятиях, однако специфика выполняемых работ и применяемого оборудования, влияющая на реализацию опасных событий, также требует подробного анализа.

Методология. Целью работы является построение байесовской сети для оценки профессиональных рисков на рабочем месте обработчика рыбы. В работе использовался эмпирический метод научного исследования, а именно автором проводилось наблюдение и описание рабочих процессов с точки зрения охраны труда на рыбоконсервном

заводе группы компаний «За Родину», расположенном в Калининградской области, а также использовался математический аппарат для установления априорных и апостериорных вероятностей. В качестве исходных данных использовалась статистика по происшедшим микротравмам и несчастным случаям с указанием их причин с обработчиками рыбы в ГК «За Родину», полученная из медицинского пункта предприятия и от руководителей структурных подразделений. Для моделирования различных сценариев реализации опасных событий использовался программный продукт *Bayes Server* [19]. Объектом исследования являлись рабочие места обработчиков рыбы в цехе по производству консервной продукции.

Результаты. Байесовская сеть – графическая вероятностная модель, включающая переменные и их вероятностные взаимосвязи. Сеть состоит из узлов, представляющих случайные переменные, и стрелок, связывающих родительский узел с дочерним узлом (родительский узел – переменная, которая непосредственно влияет на другую дочернюю переменную) [20]. В настоящем исследовании узлы распределены на три группы: к первой группе относятся факторы, влияющие на реализацию опасного события, ко второй – опасные события, к третьей – тяжесть последствий. Формула Байеса представляет вид [20]:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (1)$$

где $P(A|B)$ – апостериорная вероятность события A при условии события B ;

$P(B|A)$ – вероятность события B при условии, что произойдет событие A ;

$P(B)$ – априорная вероятность события B ;

$P(A)$ – априорная вероятность события A ;

Априорная вероятность представляет собой степень уверенности в том, что данное событие произойдет, в отсутствие любой другой информации, связанной с этим событием [21]. Это субъективная оценка, основанная на эмпирических данных исследователя, и может определяться методом экспертных оценок, с помощью статистических данных или принимается, как убежденность, что определенное событие имеет конкретную частоту реализации.

Для построения простой байесовской сети по событию «падение работника в результате поскользывания» рассмотрим частоту его реализации. В ГК «За Родину» средняя численность обработчиков рыбы в период с 01.01.24 по 31.12.24 составила 360 человек, «падение в результате поскользывания» в течение года случилось с 11 работниками, по тяжести последствий падения были отнесены к микротравмам, так как работникам была оказана первая помощь и они продолжали работу. Причиной восьми из 11 микротравм стало неприменение работниками специальной обуви с антискользящей подошвой (табл. 1).

Таблица 1 – данные по микротравме в результате падения

Опасное событие А	Вероятность реализации события $P(A)$	Причина	Априорная вероятность $P(B A')$	Тяжесть последствий
		Отсутствие специальной обуви $P(B A)$		
Падение в результате поскользывания	$11/360 = 0.031$	$8/11 = 0.730$	0.05	Микротравма

Из таблицы 1 видно, что вероятность падения (частота реализации события) $P(A)$ определяется отношением количества всех зафиксированных падений к средней численности работников, а вероятность отсутствия специальной обуви $P(B|A)$ в происшедших микротравмах рассчитывается отношением таких случаев неприменения к общему количеству микротравм.

Для выполнения расчета по формуле (1) необходимо иметь значение $P(B)$, а именно априорной вероятности, что работники не используют специальную обувь.

$P(B)$ рассчитывается по формуле полной вероятности и имеет вид:

$$P(B) = P(A)P(B|A) + P(A')P(B|A'), \quad (2)$$

где $P(A')$ – вероятность того, что событие (А) не произойдет. (A') является противоположным событием событию А и $P(A')$ может быть рассчитана, как $1 - 0.031 = 0.969$ (вероятность того, что работник не упадет).

$P(B|A')$ – вероятность события (В) при условии (A'). В рассматриваемом примере $P(B|A')$ отражает вероятность отсутствия специальной обуви, если падение не происходит. $P(B|A')$ получена путём проведения наблюдений, опросов мастеров, начальников смен и руководителя цеха, и составила 0.05. Это значит, что в случайно выбранный день

года случайно выбранный работник окажется в специальной обуви с вероятностью 95%, а без обуви – 5%. Таким образом, используя формулу (1) и формулу (2), получим уточнённую (апостериорную) вероятность:

$$P(A|B) = \frac{0.730 \times 0.031}{0.031 \times 0.730 + 0.969 \times 0.050} = 0.318$$

Интерпретация полученного значения заключается в том, что если работник не использует специальную антискользящую обувь, то риск падения, отнесенный к одному году, составляет 31.8%, что примерно в 10 раз выше, если применяет такую обувь, так как в этом случае риск составляет 3.1%.

Программный продукт «*Bayes Server*» (далее – программа) [19] существенно облегчает задачу расчёта условных вероятностей и позволяет визуализировать возможные сценарии опасных событий. Рассмотрим использование программы на примере вышеприведенных расчетов.

Первым этапом является добавление в рабочую область программы двух узлов: «априорная вероятность использования специальной обуви» и «априорная вероятность падения», что представлено на рисунке 1.

Следующим шагом является установление связи между узлами и заполнение вероятностной таблицы, представленной на рисунке 2.

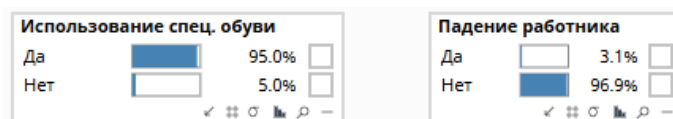


Рисунок 1 – узлы, отражающие вероятности двух событий

Падение работника	Использование спец.обуви = Да	Использование спец.обуви = Нет
Да	0,27	0,73
Нет	0,95	0,05

Рисунок 2 – вероятностная таблица для двух узлов

Для заполнения таблицы (рис. 2) необходимо рассмотреть 4 условия: 1) если падение работника произошло, то с вероятностью 0.27 он окажется в специальной обуви; 2) если падение произошло, то с вероятностью 0.73 работник окажется без специальной обуви; 3) если падение работника не произошло, то с вероятностью 0.95 он будет в специальной обуви – это наблюдаемая вероятность, установленная в ходе проведения опросов, однако может приниматься исследователем, как оценка собственной убежденности в данном факте; 4) если

падение работника не произошло, то с вероятностью 0.05 он окажется без обуви.

В результате описанных действий в программе отразится зависимость двух узлов и уточненные вероятности (рис. 3).

Для получения условной вероятности $P(A|B)$, которая была рассчитана по формуле (1), необходимо установить значение 100% для условия «нет» в узле «использование спец.обуви» нажатием на соответствующий квадрат (рис. 4).

Аналогичным образом в байесовскую сеть до-

бавляется узел «тяжесть последствий» с заполнением вероятностной таблицы, представленной на рисунке 5.

Таким образом, получаем простую байесовскую сеть (рис. 6).

Для построения расширенной сети учитывался фактор определенного нахождения работника в производственном цехе. 7 из 11 падений произошли при перемещении в зоне наколки рыбы. В данной зоне происходит загрузка рыбы на наколочный стол из моечной ванны, а также непосредственно ручная наковка рыбы, в результате чего вокруг рабочей зоны на полу образуется влага с жиром. Априорная вероятность перемещения обработчика рыбы в этой зоне была субъективно оценена в 40%.

3 из 11 падений произошли при перемещении в зоне укладки рыбы в банку. В данной зоне происходит подача готового полуфабриката (обжаренной рыбы) и непосредственно его укладка в банку, в результате чего происходит случайное падение рыбы, образуя за жиренность пола. Априорная вероятность перемещения работника в этой зоне субъективно оценена в 40%.

1 из 11 падений прошло при перемещении в зоне дефростации рыбы. Здесь происходит размораживание сырья в камерах дефростации. Процесс характеризуется высокой влажностью. В данной зоне перемещение обработчика рыбы является нечастым событием, а априорная вероятность этого события субъективно оценена в 10%.

Также в сеть было добавлено событие «порез

руки», так как порезы имеют место при выполнении операций обработчиком рыбы. В цехе по производству консервной продукции в течение года произошло 84 пореза. 73 пореза при укладке рыбы в жестяную банку, которая характеризуется острыми краями, и при неудачном её взятии в руку происходит соскальзывание, в результате чего работник получает микротравму. Необходимо отметить, что каждый порез обязательно приводит либо к микротравме, либо к несчастному случаю. В ГК «За Родину» в 2024 году был зафиксирован и расследован 1 легкий несчастный случай в результате пореза о край жестяной банки, что учтено в байесовской сети. Априорная вероятность выполнения этой операции была субъективно оценена в 40%.

10 из 84 порезов произошли при ручной разделке рыбы ножом. В данной операции обработчик рыбы производит потрошение рыбы разделочным ножом, что может приводить к микротравме. Априорная вероятность выполнения данной операции была субъективно оценена в 40%.

1 из 84 порезов произошел при укладке рыбы в стеклянную банку. Данный процесс аналогичен процессу укладки рыбы в жестяную банку, однако зафиксированная микротравма произошла по причине лопнувшей банки в руке работника, что может свидетельствовать о браке такой банки. Априорная вероятность выполнения данной операции была субъективно оценена в 40%.

Расширенная байесовская сеть представлена на рисунке 7.



Рисунок 3 – зависимость узлов «использование спец.обуви» и «падение работника»



Рисунок 4 – условная вероятность $P(A|B)$

Падение работника	Тяжесть последствий = Микротравма	Тяжесть последствий = Легкий НС	Тяжесть последствий = Тяжелый НС	Тяжесть последствий = Без последствий
Да	1	0	0	0
Нет	0	0	0	1

Рисунок 5 – вероятностная таблица узлов «тяжесть последствий» и «падение работника»

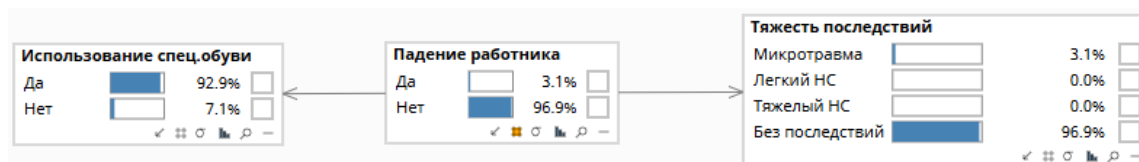


Рисунок 6 – простая байесовская сеть

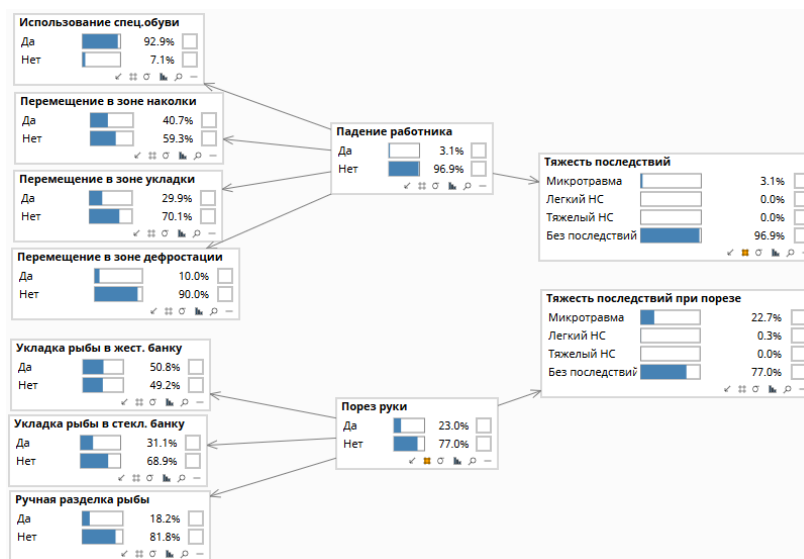


Рисунок 7 – Расширенная байесовская сеть

Обсуждение. Использование байесовских сетей в описании и прогнозировании получения микротравм работниками позволяет более детально рассматривать возможные опасные события. Это может использоваться специалистом по охране труда при проведении вводного инструктажа обработчику рыбы для ознакомления с основными профессиональными рисками.

Байесовская сеть позволяет получить: 1) прямой вывод – прогнозирование, т.е. определение вероятности события при наблюдаемых причинах, факторах; 2) обратный вывод – диагностирование, т.е. определение вероятности причины при наблюдаемых следствиях; 3) смешанный вывод – определение вероятности одной из причин наступившего события при условии наступления одной или нескольких других причин этого события [22].

На рисунке 8 представлены 2 прямых вывода.

В первом случае установлено, что если обработчик рыбы не применяет специальную обувь и перемещается в зоне наколки рыбы, то вероятность падения при таких условиях составляет 42.8%, соответствующее значение принимает и вероятность получения микротравмы, так как данная связь построена на анализе происшедших падениях, при которых несчастный случай зафиксирован не был. Во втором случае получен прямой вывод о порезе руки, если работник занят на операции по укладке рыбы в жестяную банку, то вероятность события составит 39.4%. При данном условии риск пореза выше, что должно восприниматься работником, как свидетельство о повышенной травмоопасности такой операции.

Байесовская сеть в некоторой степени похожа на метод причинно-следственного анализа, однако в байесовской сети взаимосвязи между узлами не обязательно определяются, как причинные.

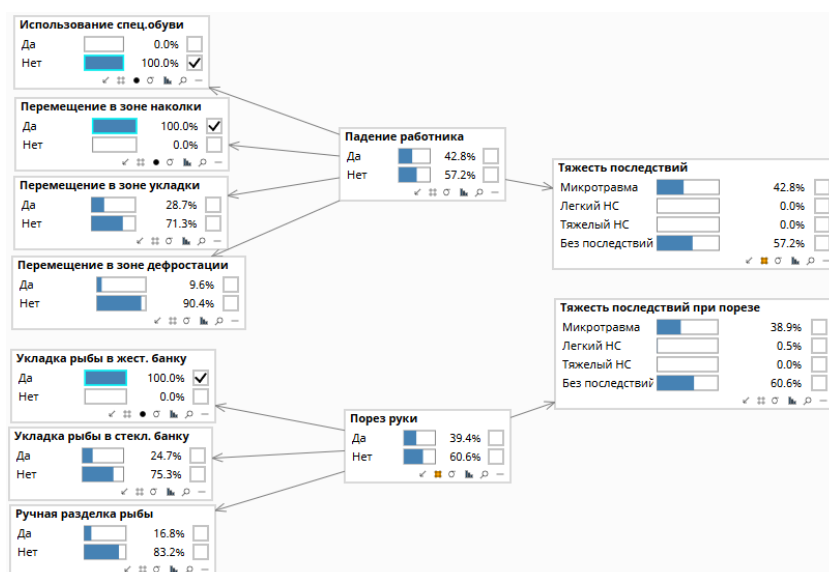


Рисунок 8 – Прогнозирование в байесовской сети

В расширенную сеть, представленную на рисунке 7, специалист, проводящий оценку профессиональных рисков, может добавлять опасные события, которые на практике на конкретном предприятии не реализовывались. Например, может быть добавлен узел «поражение работника электрическим током», причинами и факторами которого являются пробой изоляции пластинчатого конвейера, на котором занят обработчик рыбы, отсутствие заземления, нахождение работника в зоне проведения электромонтажных работ при отсутствии сигнальных обозначений о таких работах.

Выводы. Анализ литературы показал универсальность применения байесовских сетей для анализа травматизма и несчастных случаев в различных отраслях экономики, что является положительной характеристикой данного метода. Однако главным преимуществом является гибкость работы с вероятностными значениями, а также включение в взаимосвязи переменных, не имеющих точных характеристик. В отдельных случаях байесовская сеть может быть построена только на основе субъективных предположений. Рассмотренный в исследовании пример травмирования обработчика рыбы отражает возможности использования данного метода, а программное обеспечение [19] облегчает проведение расчётов. Использование данного метода, в том числе и в других отраслях экономики, позволяет создавать байесовские сети, отражающие не только риски травмирования работника по различным профессиям, но и их прогнозирование, что может использоваться в картах оценки профессиональных рисков, в материалах для проведения инструктажей, обучения по охране труда с работниками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. "Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 26.12.2024) [Электронный источник] // https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения 27.01.2025).
2. Александров А.Д., Колмогоров А.Н., Лаврентьев М.А. Математика, ее содержание, методы и значения. М: Издательство Академия наук СССР. – Т.2. – 1959. – 396 с.
3. Фокин, В.А. К вопросу о необходимости проведения количественной оценки профессионального риска / В.А. Фокин, С.В. Редько // Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения – 2023: Всероссийская научно-практическая интернет-конференция молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора с международным участием: материалы (Пермь, 11-13 октября 2023 г.). – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. – С. 342-345.
4. Кулешов, В.В. Количественная оценка влияния человеческого фактора на уровень профессионального риска / В.В. Кулешов, Н.О. Ковальковская, Е.В. Бакико, В.С. Сердюк // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности – 2021. – № 2. – С. 47-54.
5. Комзолов, А.А. Анализ методических подходов к количественной оценке профессиональных рисков / А.А. Комзолов, Т.В. Кириченко, В.Д. Бархатов, М.В. Манежева // Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика – 2022. – № 2. – С. 110-141.
6. Преображенская, Е.А. Методика оценки вероятности потери слуха, вызванной шумом / Е.А. Преображенская, А.В. Сухова, И.В. Яцына // Гигиена и санитария – 2023. – № 12. – С. 1286-1291.
7. Зайцева, Н.В. Методические подходы к оценке категорий профессионального риска, обусловленного различными видами нарушений здоровья работников, связанными с комплексом факторов рабочей среды и трудового процесса / Н.В. Зайцева, П.З. Шур, В.Б. Алексеев [и др.] // Анализ риска здоровью – 2020. – № 4. – С. 23-30.
8. Ranjan Nayak N., Kumar S., Gupta D. Network mining techniques to analyze the risk of the occupational accident via bayesian network // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2022. – Vol.13. – P. 633-641.
9. Ghasemi F., Aghaei H., Askariipoor T. Analysis of occupational accidents among nurses working in hospitals based on safety climate and safety performance: a Bayesian network analysis // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2022. – Vol. 28. – P. 440-446.
10. Shokouhi Y., Nassiri P., Mohammadfam I. Predicting the probability of occupational fall incidents: a Bayesian network model for the oil industry // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2021. – Vol. 27. – P. 654-663.
11. Yao H., She J., Zhou Y. Risk Assessment of Construction Safety Accidents Based on Association Rule Mining and Bayesian Network // Journal of Intelligent Construction. – 2024. – Vol. 2. – P. 1-16.
12. Zhang G., Thai V., Wing-Keung Law A. Quantitative Risk Assessment of Seafarers' Nonfatal Injuries Due to Occupational Accidents Based on Bayesian Network Modeling // Risk Analysis. – 2020. – Vol.40. – P. 8-23.
13. Zarei E., Karimi A., Habibi E. Dynamic occupational accidents modeling using dynamic hybrid Bayesian confirmatory factor analysis: An in-depth psychometrics study // Safety Science. – 2021. – Vol.136. – P. 105146.
14. Aliabadi M., Aghaei H., Kalatpour O. Analysis of human and organizational factors that influence mining accidents based on Bayesian network // International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. – 2020. – Vol.26. – P. 670-677.
15. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда. Итоги федеральных статистических наблюдений [Электронный источник] // https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения 27.01.2025).
16. Dos Reis D., Moro A. Assessment of Risk Factors of Upper-Limb Musculoskeletal Disorders in a Fish Processing Industry // Physical Ergonomics and Human Factors. – 2022. – Vol. 63. – P. 96-102.
17. Julius O., Didlyn K., George Q. Occupational hazards, risk and injuries of fish processors in Tombo a coastal fish landing site, Sierra Leone, West Africa // International Journal of Fisheries and Aquaculture. – 2021. – Vol.13(1). – P. 27-39.
18. Laustsen B., Ebbelohj N., Sigsgaard T. Work environment, occupational diseases and accidents among seafood industry workers in Greenland // Danish medical journal. – 2022. – Vol.69(2). – P. 1-9.
19. Bayes Server Online [Электронный источник] // <https://online.bayesserver.com/> (дата обращения 03.02.2025).
20. ГОСТ Р 58771-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Технологии оценки риска [Электронный источник] // <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (дата обращения 03.02.2025).
21. Априорная вероятность (Prior probability) [Электронный источник] // <https://wiki.loginom.ru/articles/prior-probability.html> (дата обращения 03.02.2025).
22. Утюганова, В.В. Прогнозирование и оценка профессиональных рисков в горной отрасли с применением теоремы Байеса / В.В. Утюганова, В.С. Сердюк, А.И. Фомин // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 1. – С. 79-87.

*Статья поступила в редакцию 20.03.2025
Статья принята к публикации 17.06.2025*

УДК 614.842.61

EDN: ORHROL

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ СЖИЖЕННОГО АЗОТА ПРИМЕНЕНИЕМ
МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ПЕН И ПОРОШКОВЫХ СОСТАВОВ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7433-1522

AuthorID: 1227550

ORCID: 0009-0009-5923-5764

ПРОЦЕНКО Татьяна Валерьевна, адъюнкт*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149, e-mail: 89236213028@mail.ru)*

ORCID: 0009-0004-9179-5087

АРЗАЕВ Никита Анатольевич, адъюнкт*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149, e-mail: n.arzaev@yandex.ru)*

SPIN: 1985-9518

AuthorID: 521920

ORCID: 0000-0003-2556-33X

ИВАХНЮК Григорий Константинович, доктор химических наук, профессор,

профессор кафедры «Пожарной безопасности технологических процессов и производств»

*Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149, e-mail: fireside@inbox.ru)*

Аннотация. Статья посвящена вопросам обеспечения безопасности объектов, использующих сжиженный природный газ (СПГ), за счет снижения интенсивности его испарения. Цель исследования – оценка эффективности модифицированных огнетушащих составов, основанных на минерализованных пенах, газонаполненных диоксидом углерода (CO_2), и содержащих углеродные наноструктуры (УНС). В качестве модельного вещества для экспериментов использовался жидкий азот, обладающий свойствами, сходными с характеристиками СПГ. В ходе исследования были проведены эксперименты по нанесению пен с различными концентрациями пенообразователя (3% и 6% по массе) и модификаторами, такими как УНС, зола сжигания осадков сточных вод и силиконовая жидкость в форме аэрозоля. Показано, что добавление силиконового аэрозоля предотвращает замерзание пены и способствует формированию устойчивой структуры, обеспечивающей длительную теплоизоляцию. Наилучшие результаты достигнуты при использовании 6%-ной пены с CO_2 и силиконовым аэрозолем, что позволило снизить интенсивность испарения жидкого азота в 4,3 раза. Также выявлены особенности влияния состава пены на её устойчивость и термоизоляционные свойства. Результаты исследования могут быть применены при разработке эффективных средств пожаротушения для защиты объектов СПГ.

Ключевые слова: сжиженный азот; интенсивность испарения сжиженного газа; модификаторы, порошковые составы; газонаполненная пена, углеродные наноструктуры (УНС), силиконовая жидкость.

**INVESTIGATION OF LIQUEFIED NITROGEN EVAPORATION PROCESSES USING
MINERALIZED FOAMS AND POWDER COMPOSITIONS**

© The Author(s) 2025

PROTSENKO Tatyana Valeryevna, postgraduate student*St. Petersburg State University of Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia**(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: 89236213028@mail.ru)***ARZAEV Nikita Anatolievich**, postgraduate student*St. Petersburg State University of Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia**(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: n.arzaev@yandex.ru)***IVAKHNYUK Grigory Konstantinovich**, doctor of chemical sciences, professor,

professor of the Department of "Fire Safety of Technological Processes and Productions"

*St. Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia**(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: fireside@inbox.ru)*

Abstract. The article is devoted to ensuring safety at liquefied natural gas (LNG) production facilities, where there is a high risk of explosions due to intensive vaporization and formation of explosive gas-air mixtures during accidental spills. The aim of the study was to evaluate the effectiveness of modified fire extinguishing compositions based on gas-filled (CO_2) mineralized foams and containing carbon nanostructures (CNS). Silicone liquid in the form of aerosol and powder compositions were also added to the composition to suppress the intensity of liquid gas vaporization. Liquid nitrogen was used as a model substance. Experiments showed that increasing the concentration of blowing agent (AFFF 6%) with the addition of silicone aerosol forms a stable, non-freezing foam layer that reduces the vaporization intensity up to 4.3 times. These results confirm that the use of modified foams improves safety when handling LNG, opening

prospects for the development of more effective firefighting agents.

Keywords: liquefied nitrogen; liquefied gas vaporization rate; modifiers, powder formulations; gas-filled foam, carbon nanostructures (CNS), silicone fluid.

Для цитирования: Проценко Т.В. Исследование процессов испарения сжиженного азота применением минерализованных пен и порошковых составов / Т.В. Проценко, Н.А. Арзаев, Г.К. Ивахнюк // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 229-235. – EDN: ORHROL.

Введение. Сжиженный природный газ (СПГ) играет все более значимую роль в энергетике. Однако его производство связано с повышенной пожарной опасностью, из-за использования больших объемов горючих газов в технологических процессах и при хранении. Эти факторы увеличивают риск аварий, включая выбросы, пожары и взрывы на производственных площадках [1]. Высокая взрывоопасность, вызвана интенсивным испарением и образованием взрывоопасных газозводушных смесей, требует эффективных мер безопасности.

Несмотря на значимость этой проблемы, исследования в области безопасности производства СПГ пока недостаточны, особенно в части методов снижения интенсивности испарения жидкой фазы и применения огнетушащих пен для локализации и тушения разливов [2].

Данное исследование направлено на оценку эффективности модифицированных огнетушащих составов в снижении интенсивности испарения жидкой фазы СПГ. В качестве модельного вещества использовали жидкий азот, поскольку его свойства позволяют воспроизвести процессы, характерные для СПГ.

В ходе работы проведены эксперименты по влиянию минерализованных пен, обогащенных CO_2 и модифицированных углеродными наноструктурами (УНС), а также порошковых составов на интенсивность испарения жидкого азота.

Полученные результаты способствуют повышению безопасности объектов, работающих с СПГ, совершенствованию технологий пожаротушения и снижению рисков, связанных с возможными авариями.

Методология. Модельным веществом для исследования выбран жидкий азот. Его используют благодаря сходству физико-химических свойств с СПГ и широкому применению в моделировании соответствующих процессов (табл. 1). Этот выбор способствовал безопасному проведению эксперимента и позволил получить результаты, приближенные к условиям эксплуатации СПГ.

Для экспериментального исследования процессов испарения N_2 использовалась лабораторная установка, применяемая в ранее проведенных исследованиях [3].

В исследовании в качестве материалов использовались кварц пылевидный (марки Б), зола, полученная при сжигании осадков сточных вод (зола ОСВ), а также пены на основе раствора фторсодержащего пленкообразующего пенообразователя *AFFF* (ПО) с концентрациями 3 и 6% по массе (ГОСТ 50588-2012). Эти пены были наполнены CO_2 , дополнены углеродными наноструктурами – астраленами (УНС), минеральными добавками – золой ОСВ, а также в ряде экспериментов использовалась силиконовая жидкость в форме аэрозоля и индивидуально порошок маршалита и зола ОСВ (табл. 2).

Таблица 1 – Свойства жидкого азота и метана

№ п.п.	Характеристики	Азот	Метан
1	Плотность (кг/м ³)	808	422,6
2	Температура кипения (К)	–196°С (77 К)	–161,5°С (111,6 К)
3	Молекулярная масса	28 г/моль	16 г/моль
4	Теплоемкость	1,04 кДж/(кг·К)	3,48 кДж/(кг·К)
5	Давление насыщенных паров	101,3 кПа (при –196°С)	101,3 кПа (при –161,5°С)
		0,75 кПа (при –200°С)	1,013 кПа (при –164°С)
6	Критическая температура	–146,9°С (126,25 К)	–82,3°С (190,85 К)

Таблица 2 – Рецептуры пен модифицированных УНС, используемых в исследовании

N п/п	Наименование состава	Концентрация раствора пенообразователя, масс. %	Концентрация УНС, масс. %	Концентрация минеральной добавки, масс. %
1	A / 0 / 3	3	0	10
2	B / 0,1 / 3	3	0,1	10
3	C / 0,2 / 3	3	0,2	10
4	D / 0,5 / 3	3	0,5	10
5	E / 0 / 3	6	0	10
6	J / 0,1 / 3	6	0,1	10
7	K / 0,2 / 3	6	0,2	10
8	L / 0,5 / 3	6	0,5	10

В данном исследовании применялись УНС с гидрофобными свойствами, которые диспергировались в растворе пенообразователя с концентрацией 0,1%, 0,2% и 0,5%. Диспергирование проводилось в течение одного часа при мощности ультразвука 1 кВт, частоте 40 кГц и температуре 40°C. Пены с концентрацией 3% и 6% готовили по ГОСТ Р 50588-2012. В растворы пенообразователя добавляли золу ОСВ в концентрации 10% по массе.

Зола от сжигания осадков сточных вод (зола ОСВ) представляет собой мелкодисперсный порошок желто-коричневого цвета. Удельный вес – 0,6-0,8 т/м³. Размер частиц золы ОСВ варьируется от 1,2 до 50 мкм. Материал отличается высокой дисперсностью и склонностью к пылению. Удельная поверхность золы составляет от 2000 до 3000 см²/г. Основным соединением является SiO₂ (α-кварц), его содержание – 48-54% [4].

Пылевидный кварц, или маршалит, представляет собой природный кварцевый песок в молотом виде до тонкодисперсного состояния. До 80% пылевидного кварца – это частицы с размером 50 мкм, при этом один грамм маршалита занимает на поверхности 1685 см². Состав и характеристики сырья регламентированы ГОСТ 9077-82.

Силиконы представляют собой полимерные материалы на основе кремнийорганических соединений, обладающие уникальными свойствами. Кремнийорганические жидкости обладают уникальными свойствами: физическая и химическая инертность, устойчивости вязкости к изменениям температуры, стойкость при высокой температуре,

даже в окислительной среде, гидрофобность, эластичностью и электроизоляционными характеристиками [5-11].

На следующем этапе исследования минерализованные пены и порошковые составы подавали на поверхность испаряющегося N₂, который находился в металлическом контейнере, размещенном в термостатируемом коробе (испытательной ячейке), в течение 60 секунд фиксировалось изменение массы испаряющегося вещества. Данные с термопар и весов фиксировались с помощью видеосъемки.

Интенсивность испарения рассчитывалась по формуле 1:

$$W = \Delta m / \Delta \tau \quad (1)$$

где, W – интенсивность испарения криогенной жидкости, г/м²с

$$\Delta \tau = \tau_2 - \tau_1 \quad (2)$$

где τ_2 – время окончания эксперимента, с; τ_1 – время начала эксперимента, с.

$$\Delta m = m_1 - m_2 \quad (3)$$

где, m_1 – это масса жидкости на момент времени τ_1 , г; m_2 – масса жидкости на момент времени τ_2 , г.

Также производилось визуальное изучение структур составов, образовавшихся в процессе испарения сжиженного азота.

Результаты. В ходе проведенных экспериментов с газонаполненной минерализованной пеной на основе 3% раствора пенообразователя, исходя из полученных результатов (рис. 1), установлено, что при нанесении огнетушащих составов на поверхность жидкого азота образовывалась пена с неоднородной структурой.



Рисунок 1 – Гистограмма зависимости интенсивности испарения жидкого азота от концентрации УНС в газонаполненных минерализованных пенах на основе 3% пенообразователя

Так как пена подавалась на поверхность с крайне низкими температурами, молекулы воды в пене начинали терять кинетическую энергию и упорядочиваются в кристаллическую решетку. Воздушные пузырьки внутри пены служили центрами кристаллизации, вокруг них формировались кристаллы льда. По мере роста кристаллов

газ CO₂ вытеснялся из структуры пены, что приводило к её уплотнению и уменьшению объема. Таким образом, замерзшая пена теряла способность эффективно изолировать поверхность, поскольку её структура разрушалась, а воздушные каналы блокировались льдом.

При увеличении концентрации модификаторов

в составе пенообразователя наблюдается нелинейная зависимость интенсивности испарения от концентрации УНС в минерализованных пенах.

При проведении исследований с минерализованной газонаполненной пеной на основе 6% раствора пенообразователя, исходя из полученных результатов (рис. 2) установлено, что пенообразование было более интенсивное, и объем пены заполнял от 25% до 50% объема испытательной ячейки.

Архитектура пены, а именно её верхний и средний слои, представляли рыхлые, неустойчивые структуры в результате интенсивного охлаждения. Нижний слой пены подвергался фазовому переходу с образованием плотной ледообразной оболочки. При распылении силиконового аэрозоля на поверхности пены наблюдалось, что она не подвергалась промерзанию и представляла более стойкую неоднородную структуру с размером пор до 20 мм.

При применении составов с добавлением силиконового аэрозоля интенсивность испарения снижалась, по сравнению с образцами без его добавления. Наличие частиц золы ОСВ стабилизировали структуру пены, уменьшая риск её разрушения.

Это можно объяснить тем, что частицы золы ОСВ, обладающие гидрофильными свойствами, увеличивают вязкость жидкой фазы пены, что уменьшает скорость миграции пузырьков газа и вероятность их столкновения с последующим слиянием.

Наилучший результат испытаний был получен при применении минерализованной пены на основе водного раствора пенообразователя 6% по массе без добавления УНС, газонаполненной CO_2 с применением силиконового аэрозоля. Интенсивность испарения составила $0,03 \text{ г/м}^2 \cdot \text{с}$, что более чем в 4 раза ниже по сравнению с контрольным образцом.

Результаты исследования интенсивности испарения жидкого азота при индивидуальном применении порошковых составов представлены на рисунке 3, что демонстрирует их незначительное влияние на интенсивность испарения.

При индивидуальном применении порошковых составов абсолютные показатели интенсивности испарения N_2 не увеличивались, однако, отличались незначительно от показателей интенсивности испарения контрольного состава.

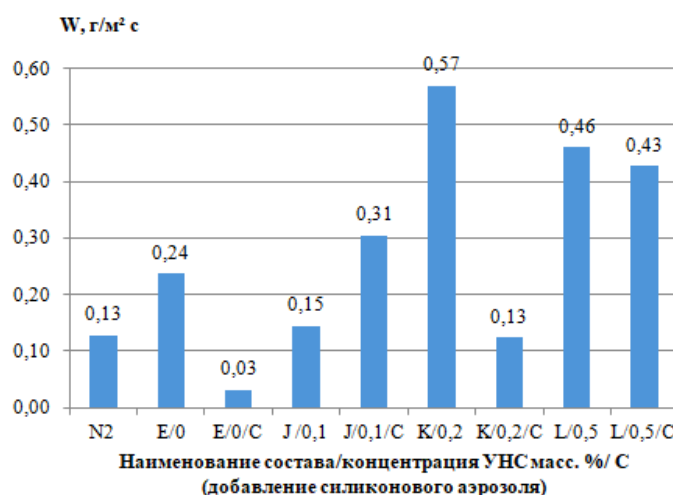


Рисунок 2 – Гистограмма зависимости интенсивности испарения жидкого азота от концентрации УНС в газонаполненных минерализованных пенах на основе 6% пенообразователя

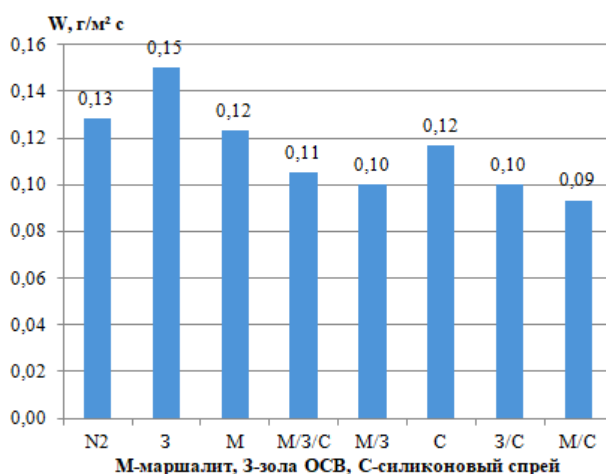


Рисунок 3 – Гистограмма зависимости интенсивности испарения сжиженного азота от порошковых составов

При применении золы ОСВ в металлическом контейнере наблюдалось слипание частиц порошков и формированием комочков различных размеров до 10 мм. Это объясняется содержанием незначительного количества воды в золе, которая при низких температурах начинала испаряться, превращаясь в газ. Однако фазовый переход воды при критически низких температурах происходит очень быстро. Так как зола ОСВ обладает гидрофильными свойствами, её структура "схватывает" образующиеся пары воды, которые затем конденсируются, замерзают и образуют твердые агрегаты (комочки). Порошковые составы, обладают пористой структурой. Эти поры позволяют захватывать и удерживать молекулы пара сжиженных газов, способствуя их конденсации в пористой структуре. Конденсация газа в порах материала может снижать скорость испарения. За счет этого улучшается теплоизоляция, поскольку капиллярные силы препятствуют контакту газа с окружающей средой и замедляют теплообмен. Кроме того, структуры способствуют удержанию жидкой фазы.

Показатели интенсивности испарения N_2 (контрольного состава) составили 0,13 г/м²с. Показатели интенсивности испарения N_2 при применении минерализованных пен на основе раствора 3% пенообразователя обогащенных CO_2 с добавлением золы ОСВ и УНС различной концентрации составили от 0,16 до 0,39 г/м²с.

Таким образом, при применении минерализованной пены без добавления УНС на основе 6% пенообразователя, содержащей CO_2 и с применением силиконового аэрозоля, показатели интенсивности испарения были в 4,3 раза ниже, чем при испарении N_2 без применения составов. В данной концентрации минерализованная пена более стабильна, не подвержена фазовому переходу, сопровождающемуся разрушению.

Обсуждение. При нанесении минерализованной пены на жидкий азот формировался изолирующий слой. Однако при взаимодействии низких температур газонаполненная пена быстро замерзала и разрушалась. Добавление силиконового аэрозоля предотвращало её замерзание, обеспечивая стабильность структуры.

Минерализация пены золой ОСВ, обладающей гидрофильными свойствами, повышала когезию и усиливала взаимодействие молекул воды в растворе пенообразователя. Полярные группы на поверхности частиц золы притягивали молекулы воды, формируя гидратную оболочку. Частицы золы ОСВ также адсорбировали поверхностно-активные вещества (ПАВ), что способствовало равномерному распределению ПАВ в пене и повышало устойчивость пузырьков газа.

Частицы золы ОСВ выполняли функцию микроармирования, создавая внутри пены структурный каркас. Они образовывали "мостики" между пузырьками газа, предотвращая их слипание

и разрушение. При этом вкрапление золы в междудузлие газонаполненной пены способствовало увеличению механической прочности материала за счет формирования дополнительных точек контакта и распределения напряжений. Кроме того, частицы золы, обладая высокой дисперсностью и специфической поверхностной активностью, взаимодействовали с полимерной матрицей, изменяя реологические свойства пены и способствуя её минерализации. В результате минерализованная пена становилась более стабильной, демонстрировала улучшенные термостойкие характеристики и сохраняла свои изолирующие свойства на протяжении более длительного времени.

Эксперименты с нанесением минерализованной пены, содержащей CO_2 и модифицированные УНС, на жидкий азот, как и предыдущие исследования с 3% и 6% раствором пенообразователя AFFF, не выявили линейной зависимости между интенсивностью испарения и у концентрацией УНС. Это может быть связано с изменением свойств УНС и разрушением пены при экстремально низких температурах [5, 12-20].

Наибольшее снижение интенсивности испарения наблюдалось при использовании составов с устойчивой структурой, не подверженной фазовым переходам. Эксперименты с минерализованной пеной, содержащей силиконовый аэрозоль, показали, что она сохраняла устойчивость и не замерзала, образуя термоизолирующий барьер. Это препятствовало теплопередаче к жидкому азоту и снижало интенсивность его испарения.

Результаты исследования показывают, что для эффективного снижения испарения сжиженного азота необходимо применять составы, устойчивые к низким температурам, обеспечивающие долговременный изолирующий слой на поверхности испаряющейся жидкости.

Выводы. Аварии на объектах, связанных с обращением СПГ, представляют значительную угрозу, поскольку СПГ обладает высокой скоростью испарения. Это приводит к образованию обширного облака взрывоопасной газовой смеси даже при низких концентрациях (5-15%). В настоящее время отсутствуют эффективные огнетушащие составы, способные надежно предотвращать образование взрыво- и пожароопасных концентраций при авариях на таких объектах.

По результатам проведенных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Минерализованная пена на основе 3% водного раствора пенообразователя AFFF с модификаторами УНС (0,1; 0,2; 0,5% по массе) характеризовалась слабым пенообразованием. Объем пены ограничивался металлическим контейнером, а в нижнем слое она полностью промерзала, приобретая плотную структуру. Увеличение концентрации УНС приводило к уменьшению максимального размера пузырьков с 10 мм до 5 мм. При этом интенсивность

испарения составов (0,16-0,39 г/м²•с) превышала интенсивность испарения N_2 (0,13 г/м²•с);

2. Минерализованная пена на основе 6% водного раствора пенообразователя AFFF с модификаторами УНС (0,1; 0,2; 0,5% по массе) образовывала более обильную пену, превышающую объем металлического контейнера и заполняющую испытательную ячейку. В нижнем слое пена подвергалась фазовому переходу, в среднем и верхнем слоях наблюдалось увеличение размеров ячеек по мере удаления от поверхности жидкого азота. С увеличением концентрации УНС размер ячеек уменьшался с 20 мм до 5 мм. Интенсивность испарения этих составов (0,15-0,46 г/м²•с) также была выше, чем у N_2 (0,13 г/м²•с);

3. Минерализованная пена на основе 6% водного раствора пенообразователя AFFF с модификаторами УНС и силиконовым аэрозолем демонстрировала значительное пенообразование, при этом объем пены превышал размеры контейнера и заполнял испытательную ячейку. Добавление силиконового аэрозоля предотвращало замерзание пены, обеспечивая стойкую структуру. С увеличением концентрации УНС максимальный размер пузырьков уменьшался с 12 мм до 7 мм. Интенсивность испарения составов варьировалась в пределах 0,03-0,43 г/м²•с. В случае применения состава без УНС, но с силиконовым аэрозолем, интенсивность испарения снижалась в 4,3 раза (0,03 г/м²•с);

4. Применение порошковых составов показало незначительное снижение интенсивности испарения. Однако частицы золы ОСВ слипались, образуя комки диаметром до 10 мм. Добавление силиконового аэрозоля предотвращало слипание, но интенсивность испарения снижалась незначительно. Значения интенсивности испарения (0,09-0,15 г/м²•с) мало отличались от испарения N_2 (0,13 г/м²•с).

Результаты исследования показали, что увеличение концентрации пенообразователя в составе минерализованных пен существенно улучшает их пенообразующие свойства. Добавление силиконовой жидкости способствует созданию устойчивого слоя пены, не подверженного замерзанию и разрушению. При этом использование УНС в качестве модификатора не выявило линейной зависимости между его концентрацией и интенсивностью испарения, что свидетельствует о сложных процессах, происходящих при низких температурах.

Таким образом, снижение интенсивности испарения сжиженных газов достигается за счет повышения устойчивости пенного слоя на поверхности жидкого азота, предотвращающего его замерзание. Этому способствуют:

– минерализация пены частицами золы ОСВ, обладающей гидрофильными свойствами, что увеличивает когезионные взаимодействия молекул воды. Полярные группы на поверхности частиц золы притягивают молекулы воды, формируя гидратную оболочку.

– повышение вязкости водного раствора за счет адсорбции золой ОСВ поверхностно-активных веществ, что способствует стабилизации структуры пены и снижает вероятность разрушения пузырьков газа.

Создание барьерного слоя, препятствующего теплообмену между жидким азотом и окружающей средой.

Добавление гидрофильных компонентов, таких как зола ОСВ, оказывает комплексное влияние на физико-химические свойства пены, улучшая её стабильность и адгезию. Эти результаты открывают новые возможности для разработки более эффективных огнетушащих систем на основе газонаполненных пен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Самигуллин Г.Х., Евлов З.Б., Шарапов С.В. Сравнительный анализ чрезвычайных ситуаций на объектах по производству, хранению, отгрузке сжиженного природного газа и сжиженного углеводородного газа // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2024. – № 4(72). – С. 81-92.
2. Алешков М.В., Молчанов В.П., Бастриков Д.Л., Макаров С.А., Третьяков А.В., Иошенко Д.А. Перспективы научных исследований свойств воздушно-механической пены для локализации и ликвидации горения разлизов сжиженного природного газа // Пожары и ЧС, 2022. №1. – С. 12-20.
3. Проценко Т.В. Исследование процессов подавления испарения сжиженного азота применением модифицированных воздушно-механических пен и порошковых составов // Сибирский пожарно-спасательный вестник, № 1, 2025. – С. 96-106.
4. Шахов С.А. Вещественный состав и свойства золы от сжигания осадков бытовых сточных вод // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – №2. – С. 31-39.
5. Yilgor E., Yilgor I., Silicone containing copolymers: Synthesis, properties and applications // Progress in Polymer Science. – 2014. – № 39. – С. 1165-1195.
6. Методическое пособие по выбору средств и способов локализации и ликвидации пожаров с участием горящего сжиженного природного газа // Пожарная безопасность: сайт пожарных и спасателей Fireman.club: сайт. – URL: <https://fireman.club/literature/mp-po-vyboru-sredstv-i-sposobov-lokalizacii-i-likvidacii-pozharov-s-uchastiem-goryashhego-szhizhennogo-prirodnogo-gaza-2023/> (дата обращения: 24.12.2024).
7. Bellur K., Médiçi E.F., Kulshreshtha M., Konduru V., Tyrewala D., Tamilarasan A., McQuillen J., Leão J.B., Hussey D.S., Jacobson D.L., Scherschligt J., Hermanson J.C., Choi C.K., Allen J.S., A new experiment for investigating evaporation and condensation of cryogenic propellants // Cryogenics. – 2016. – № 74. – С. 131-137.
8. Guo X., Ye C., Liang X., Pan X., Hua M., Cyril G.S., Yang Q., Godwin Suetor Cyril, Qian Yang, Analysis on the effects of high expansion foam on evaporation rate of the LNG 2nd ed. Elsevier Inc. – 2021. – 137p.
9. Российская Федерация. Об утверждении свода правил «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности»: Приказ МЧС РФ от 25.03.2009 № 182.
10. Гериш В.А., Райкова В.М. Пожаровзрывоопасность сжиженных углеводородных газов при хранении и транспортировке // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – №4 (84).
11. Wolfgang Lutz. Zeolite Y: Synthesis, Modification, and Properties – A Case Revisited // Advances in Materials Science and Engineering. – 2014. – № 1. – С. 1-20.
12. Krishnana P., Al-Rabbat A., Zhang B., Huangc D., Zhan-ga L., Zeng M., M. Mannana S., Chenga Z. Improving the stability of high expansion foam used for LNG vapor risk mitigation

using exfoliated zirconium phosphate nanoplates // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – № 123. – P. 48-58.

13. Кузьмин А.А., Романов Н.Н., Шарапов С.В. Автоматизированная оценка зон воздействия опасных факторов пожара при разливе сжиженного природного газа в условиях чрезвычайной ситуации // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 4 (68). – С. 63-76.

14. Архипова Н.В. Аналитический обзор аварий с пожарами и взрывами на объектах с обращением сжиженного природного газа // Вестник науки. – 2023. – №6 (63).

15. Российская Федерация. Об утверждении национального стандарта: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.03.2017 № 219-ст.

16. Российская Федерация. Об утверждении национального стандарта: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.04.2010 № 68-ст.

17. Российская Федерация. Об утверждении национального стандарта: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14.05.2012 № 66-ст.

18. Российская Федерация. Об утверждении Государственного стандарта: Постановление Госстандарта СССР от 02.02.1982 № 146.

19. Российская Федерация. Об утверждении национального стандарта: Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2012 № 1971-ст.

20. Российская Федерация. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: Приказ МЧС России от 10.09.2009 № 404.

Статья поступила в редакцию 26.03.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 614.841.4

EDN: LUSWRX

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ
ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В
УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3196-0160

AuthorID: 1122887

ORCID: 0000-0002- 8059-6988

ПУСТОВАЛОВ Илья Андреевич, кандидат технических наук,

преподаватель кафедры механики и инженерной графики

Академия государственной противопожарной службы МЧС России

(129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, e-mail: pustovalov_article@mail.ru)

SPIN: 5185-2992

AuthorID: 1128865

ORCID: 0009-0008-8998-0143

ФРОЛОВ Сергей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент,

заведующий кафедрой механики и инженерной графики

Академия государственной противопожарной службы МЧС России

(129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, e-mail: s_v_frolov@mail.ru)

SPIN: 8233-6018

AuthorID: 759893

ORCID: 0009-0004-4121-4379

ФРОЛОВ Денис Васильевич, старший преподаватель кафедры механики и инженерной графики

Академия государственной противопожарной службы МЧС России

(129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4, e-mail: dendiablo@mail.ru)

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования прочностных характеристик применяемых в нефтегазовой отрасли марок сталей: 09Г2С, 10ХН8Д, 06МБФ, а также сравнительный анализ со сталью марки Ст3сп. Представлены расчетные данные, позволяющие оценить время достижения предельных состояний конструктивных элементов вертикального стального резервуара, содержащего нефтепродукт, в условиях теплового воздействия. Рассмотрен случай воспламенения паров нефтепродукта в резервуаре объемом 10000 м³, размещённом в группе на расстоянии, утверждённом действующими нормативно-правовыми актами. В качестве топлива, сгораемого в условиях пожара, рассмотрены следующие нефтепродукты: мазут, бензин, керосин, нефть, дизельное топливо. При решении задачи тепломассобмена применялся коэффициент облученности для элементарной площадки соседнего резервуара. Расчётное время достижения предельного состояния стенки оценивалось в соответствии с условием снижения значения предела текучести стали при температуре 600°C ($\sigma_{\text{T}}^{600^\circ\text{C}}/\sigma_{\text{T}}^{20^\circ\text{C}} \geq 0,6$). В рамках аналитического обзора учитывались современные данные, полученные в результате российских и зарубежных исследований. Полученные результаты позволяют сформулировать выводы о целесообразности применения различных марок сталей при проектировании вертикальных стальных резервуаров и резервуарных парков, а также необходимость проведения дополнительных огнезащитных мероприятий.

Ключевые слова: резервуар, сталь, нестационарная теплопроводность, предел текучести, нефтегазовый комплекс, пожар.

**INVESTIGATION OF THE LOSS OF STRENGTH PROPERTIES OF STRUCTURAL ELEMENTS
OF A VERTICAL STEEL TANK FOR STORING PETROLEUM PRODUCTS IN CONDITIONS
OF UNSTABLE THERMAL CONDUCTIVITY**

© The Author(s) 2025

PUSTOVALOV Ilya Andreevich, candidate of technical sciences,

lecturer of the Department of Mechanics and Engineering graphics

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia

(129366, Russian Federation, Moscow, street Borisa Galushkina St., 4, e-mail: pustovalov_article@mail.ru)

FROLOV Sergey Vladimirovich, candidate of physical and mathematical sciences,

head of the Department of Mechanics and Engineering graphics

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia

(129366, Russian Federation, Moscow, street Borisa Galushkina St., 4, e-mail: s_v_frolov@mail.ru)

FROLOV Denis Vasilyevich, senior lecturer of the Department of Mechanics and Engineering graphics

Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia

(129366, Russian Federation, Moscow, street Borisa Galushkina St., 4, e-mail: dendiablo@mail.ru)

Abstract. The article presents the results of a study of the strength characteristics the common steel grades in the

oil and gas industry: «09Г2С, 10ХНЦД, 06МБФ», as well as a comparative analysis with steel grade «Ст3сп». The calculated data are presented, which make it possible to estimate the time to reach the limiting states of the structural elements of a vertical steel tank containing petroleum products under thermal conditions. The case of ignition of petroleum product vapors in a 10,000 m³ tank placed in a group at a distance approved by current regulatory legal acts is considered. The following petroleum products are considered as fuel that can be burned in a fire: fuel oil, gasoline, kerosene, oil, diesel fuel. When solving the problem of heat and mass transfer, the irradiation coefficient was used for the elementary site of the neighboring reservoir. The estimated time to reach the limit state of the wall was estimated in accordance with the condition for reducing the yield strength of steel at a temperature of 600°C ($\sigma_T^{600^\circ\text{C}}/\sigma_T^{20^\circ\text{C}} \geq 0,6$). The analytical review took into account modern data obtained as a result of Russian and foreign research. The results obtained allow us to formulate conclusions about the expediency of using various grades of steels in the design of vertical steel tanks and tank farms, as well as the need for additional fire-retardant measures.

Keywords: reservoir, steel, unsteady thermal conductivity, yield strength, oil and gas complex, fire.

Для цитирования: Пустовалов И.А. Исследование потери прочностных свойств элементов конструкции вертикального стального резервуара для хранения нефтепродуктов в условиях нестационарной теплопроводности / И.А. Пустовалов, С.В. Фролов, Д.В. Фролов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 236-242. – EDN: LUSWRX.

Введение. Нефтегазовая отрасль включает в себя комплекс объектов, связанных с добычей, транспортировкой, переработкой и хранением нефти и газа. Хранение нефтепродуктов осуществляется на нефтебазах, основной частью которых являются резервуарные парки – резервуары для хранения нефти, объединенные в группы.

Допустимая общая вместимость группы наземных резервуаров нормируется (СП 155.13130.2014) и составляет от 80000 до 200000 м³ нефтепродуктов в зависимости от типа резервуара и обрабатываемого вещества. Поэтому каждая авария на объектах нефтегазового комплекса (НГК), связанная с нарушением целостности или герметичности емкостей при наличии экзотермических реакций, может привести к возникновению пожароопасной ситуации. С учетом близкого расположения резервуаров, пожары приобретают масштабный и затяжной характер, при этом высока вероятность риска каскадного развития аварии [1-5].

Одним из опасных факторов пожара горящего резервуара для рядом расположенного резервуара является тепловое излучение от факела пламени.

В настоящей работе на базе закона Стефана-Больцмана были проведены конкретные расчеты времени достижения температур критических состояний (по пределу текучести) стенок резервуара из различных марок сталей при воздействии тепла от сгорания нефтепродуктов рядом расположенного второго резервуара.

Плотность лучистого теплового потока, формируемого при пожарах в резервуарах, исследована в работах [6-10]. Аналитическая зависимость закона Стефана-Больцмана (1) позволяет рассчитать данный параметр при горении паров нефтепродукта в резервуаре исходя из теплоты пожара (2):

$$q_{\lambda} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S \cdot \cos \theta}{\pi \cdot r^2} \quad (1)$$

где, q_{λ} – лучистый тепловой поток, Вт; ε – степень черноты излучающего тела; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К⁴); T – температура

излучающего тела, К; T_0 – температура окружающей среды, К; S – площадь пожара, м²; θ – угол отклонения излучения от нормали.

$$q_{\lambda} = \beta \cdot v_{\lambda}^{np} \cdot S_{\lambda} \cdot Q_{\lambda} \quad (2)$$

где, β – коэффициент полноты сгорания; v_{λ}^{np} – приведенная массовая скорость выгорания, кг/(м²·сек.); S_{λ} – площадь пожара, м²; Q_{λ} – низшая теплота сгорания, кДж/кг.

Данные условия требуется учитывать при проектировании резервуарных парков, поскольку в результате воздействия высоких температур снижаются прочностные характеристики материала резервуаров, что может привести к потере устойчивости конструкции и, как следствие, ее разрушению. А способность конструкции воспринимать усилия рабочих нагрузок, не разрушаясь и не образуя пластических деформаций сверх установленных величин, является необходимым условием обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации технологического оборудования. В настоящее время в качестве материала резервуаров нефтегазового комплекса преимущественно используются стали с рядом специальных свойств, среди которых большое внимание уделяется огнестойким сталям (СП16.13330.2017).

К основным требованиям по сталям, применяемым для изготовления резервуаров, относят:

1. Достаточно высокие прочностные свойства (предел прочности, предел текучести).
2. Способность сохранять высокие прочностные свойства при повышенных температурах.
3. Повышенная коррозионная стойкость (способность сопротивления длительному воздействию агрессивных жидкостей).
4. Удовлетворительная свариваемость (обеспечение надежности неразъемных соединений узлов конструкций).

Повреждения резервуаров и емкостей с ЛВЖ и ГЖ происходят в местах наиболее нагруженного конструктивного элемента – корпуса резервуара (заполненного продуктом), прочностные свойства

которого значительно снижаются при повышении температуры. Поэтому применительно к различным температурным режимам работы рекомендованы следующие стали: при температуре до плюс 475°C – стали низколегированные (09Г2С, 12ХМ, 10ХСНД и др.); при высоких температурах (до плюс 1000°C) – высоколегированные жаропрочные стали с большими добавками хрома, никеля и небольшим количеством вольфрама, кремния, титана (ХН38ВТ, 30Х24Н12СЛ).

В рамках изучения поведения огнестойкой строительной стали при нагреве до 600°C решена задача по разработке требований и состава конструкционной огнестойкой стали. Критерий оценки огнестойкости стали – отношение предела текучести при температуре стали 600°C к пределу текучести при комнатной температуре (20°C) – $\sigma_{\text{т}}^{600^\circ\text{C}}/\sigma_{\text{т}}^{20^\circ\text{C}} \geq 0,6$. Известны два типа огнестойких сталей: 06БФ, 06МБФ классом прочности С345П. Предполагается, что вышеуказанный показатель огнестойкости этих сталей в два раза превышает соответствующий для 09Г2С, что позволяет снизить экономические затраты на производство конструкции благодаря уменьшению толщины огнезащитного покрытия.

Огнезащитные покрытия широко используют для повышения тепловой защиты [11, 12], а также снижения коррозионной активности [13] – длительное воздействие которой вызывает уменьшение сечений и деградацию свойств применяемой стали. В то же время, современные исследования [14] демонстрируют вероятность самовоспламенения продуктов коррозии, специфической для нефтехимической промышленности. Таким образом, обеспечение надежности функционирования сооружений на объектах нефтегазового комплекса на протяжении всего срока службы, а также прогнозирование огнестойкости и поведения этих конструкций в условиях пожара является практически значимым направлением исследования [15].

В исследованиях [16-18] приведены результаты изменения механических свойств образцов применяемого в нефтегазовой отрасли металлопроката различного класса прочности (СтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД и др.) под воздействием температуры в интервале от 20°C до 850°C. Для оценки огнестойкости проката использовалось вышеупомянутое условие. Были установлены темпера-

турные пределы, при которых снижение предела текучести стали опускается ниже 60% от исходного значения.

Полученные в этих работах результаты и легли в основу настоящего расчетно-аналитического исследования предельных состояний вертикальных наземных стальных резервуаров.

Методология. В качестве объекта исследования представлен наземный вертикальный стальной резервуар со стационарной крышей с номинальным объемом 10000 м³, являющийся составной частью группы резервуаров для хранения нефтепродуктов. Толщина стенки верхнего пояса составляет 0,008 м, диаметр 28,5 м, расстояние между соседними резервуарами в группе – 21,375 м.

В рамках исследования рассматривались стали, используемые для изготовления резервуаров: углеродистая конструкционная сталь СтЗсп (ГОСТ 380-2005); низколегированная сталь 09Г2С (ГОСТ 19281-2014); низколегированная сталь марки 10ХСНД (ГОСТ 19281-2014); огнестойкая сталь марки 06МБФ (ТУ 14-1-5399-2000) (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Химический состав базовых сплавов

Массовая доля элементов, %	Марка стали			
	10ХСНД	09Г2С	СтЗсп	06МБФ
Железо (Fe)	от 96,0	96,0-97,0	от 97,8	от 97,6
Хром (Cr)	0,60-0,90	до 0,30	до 0,30	0,66
Медь (Cu)	0,40-0,60	до 0,30	до 0,30	0,13
Никель (Ni)	0,50-0,80	до 0,30	до 0,30	0,10
Фосфор (P)	не более 0,035	до 0,03	до 0,040	До 0,02
Марганец (Mn)	0,50-0,80	1,3-1,7	0,4-0,65	0,79
Кремний (Si)	0,80-1,10	0,50-0,80	0,12-0,3	0,33
Сера (S)	не более 0,035	до 0,035	до 0,040	До 0,01
Азот (N)	до 0,008	до 0,008	до 0,008	0,008
Углерод (C)	до 0,12	до 0,12	0,14-0,22	0,06-0,09

Время достижения критического состояния стенки резервуара номинальным объемом 10000 м³ определялось для случая его наполненности до расчётной высоты налива. Расчётная высота налива зависит от модели резервуара и его объёма. В нашем случае – 11,1 м.

Таблица 2 – Физико-химические свойства нефтепродуктов, приведенные в Справочнике Баратова А.Н., Кирильченко А.Я., Кравчук Г.Н.

Тип нефтепродукта	Низшая теплота сгорания, кДж/кг	Массовая скорость выгорания, кг/(м ² ·сек)	Плотность, кг/м ³	Коэффициент полноты сгорания
Бензин	43580	0,035	800	0,85
Нефть	46024	0,023	1040	0,85
Дизельное топливо	43419	0,038	788	0,8
Мазут	41840	0,015	995	0,85
Керосин	43700	0,03	820	0,85

Данная характеристика используется при нахождении коэффициента облученности элементарной площадки облучаемой стенки для расчета количества тепла, подводимого к поверхностному слою ЛВЖ:

- от теплообмена с облучаемой стенкой, которая контактирует с ЛВЖ;
- при теплообмене с облучаемой стенкой, ограничивающей газовое пространство;
- при теплообмене с крышей с крышей облучаемого резервуара.

Результат – количество тепла, отводимого от стенки РВС в объем ЛВЖ.

В качестве упрощения принято, что поверхность резервуара не обработана огнестойким покрытием, не обшита профилированным листом, и резервуар не оборудован системой водяного охлаждения.

Исходные данные для определения времени достижения критической температуры стенки резервуара (3) подбирались с учетом результатов исследовательских работ [6, 19, 20]. Путем сопоставления экспериментальных данных изменения

предела текучести сталей, представленных в работах [16–18] с расчетными данными определялось время достижения предельного состояния облучаемой стенки резервуара в зависимости от типа стали.

$$t_w = \frac{0.95 \cdot q_w}{2 \cdot \alpha} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{1.28 \cdot \alpha \cdot \tau}{c_w \cdot p_w \cdot \delta_w} \right) \right] + t_f \quad (3)$$

где, t_w – текущая температура стенки, °С; q_w – плотность падающего теплового потока от факела горящего резервуара, Вт·м⁻²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт·м⁻²·К⁻¹; τ – время облучения, сек; c_w – теплоемкость материала конструкции, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; p_w – плотность материала конструкции, кг·м⁻³; δ_w – толщина стенки резервуара, м; t_f – температура окружающей среды, °С.

На рисунке 1 представлена расчетная схема облучаемой поверхности резервуара. Указано изменение расчетного коэффициента облученности для элементарной площадки соседнего резервуара ($K_{обл.}$) в зависимости от сгораемого вещества. Минимальный коэффициент облученности составляет 0.107 для мазута, максимальный – 0.152 для дизельного топлива.

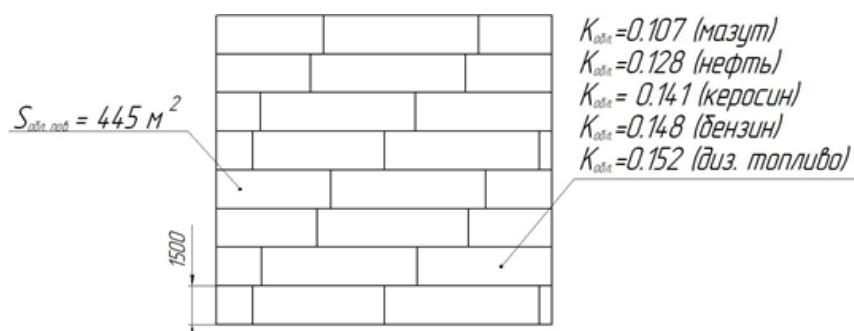


Рисунок 1 – Характеристики облучаемой поверхности стенки рядом стоящего РВС-10000 в зависимости от горящего вещества

Значения плотности теплового потока, который воспринимает участок стенки РВС шириной 23300 мм (с учетом фактора видимости) варьируются от 24,8 до 87,2 кВт/м² в зависимости от типа ЛВЖ. Исходные данные механических свойств сталей, используемые для оценки поведения конструкции представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Механические свойства исследуемых сплавов в зависимости от температуры достижения критического предела текучести [16–18]

Характеристика	Марка стали							
	10ХСНД		09Г2С		06МБФ		Ст3сп	
	20 °С	550 °С	20 °С	510 °С	20 °С	610 °С	20 °С	500 °С
Предел текучести, МПа	426	256	408	246	413	248	316	186
Предел прочности, МПа	584	340	529	235	621	303	424	229

При проведении расчетов учитывался теплоотвод от стенки резервуара к поверхностному слою ЛВЖ и во внутреннее пространство резервуара.

Результаты. Расчетная температура стенки РВС при воздействии на нее лучистого теплового потока зависит от характеристик горючего вещества.

Анализ данных, приведенных на рисунке 2 показал, что при горении паров мазута температура стенки облучаемого резервуара не превышает 343°С на всем рассматриваемом временном промежутке (30 мин). Расчетная температура облучаемого участка стенки РВС достигает наибольших значений (~718°С и ~702°С) при воздействии тепловых потоков, формируемых при горении паров дизельного топлива и бензина соответственно.

На основании исследований [18] по изучению динамики падения значения предела текучести сталей (Ст3сп; 09Г2С; 10ХСНД; 06МБФ) рассчитывалось время достижения предельного состояния стенки РВС из указанных марок сталей (рис. 3) в зависимости от природы сгораемого нефтепродукта. Видно, что предельное состояние предела текучести, определяемое из условия ($\sigma_T^{600^\circ\text{C}} / \sigma_T^{20^\circ\text{C}} \geq 0,6$) не достигается ни для одной рассматриваемой марки стали при горении мазута.

Расчетное время достижения предельного

состояния конструктивного элемента резервуара из стали марки 06МБФ достигается спустя 745 секунд, а из стали 10ХСНД – спустя 573 секунды при воздействии теплового потока от горения паров дизельного топлива. Наиболее быстрый (агрессивный) нагрев стенки резервуара проис-

ходит при горении паров дизельного топлива и более длительное время достижения предельного состояния наблюдается у стали 06МБФ. На втором месте – сталь 10ХСНД. Наименьшее время показывает сталь СтЗсп, что вполне ожидаемо от углеродистой стали обыкновенного качества.

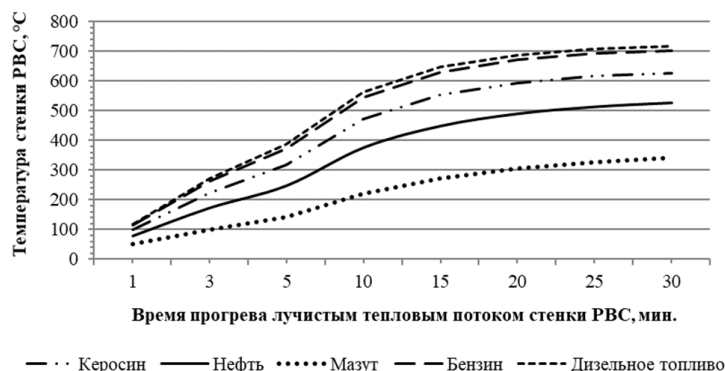


Рисунок 2 – График изменения температуры участка стенки РВС при воздействии тепловых потоков от различных типов нефтепродукта

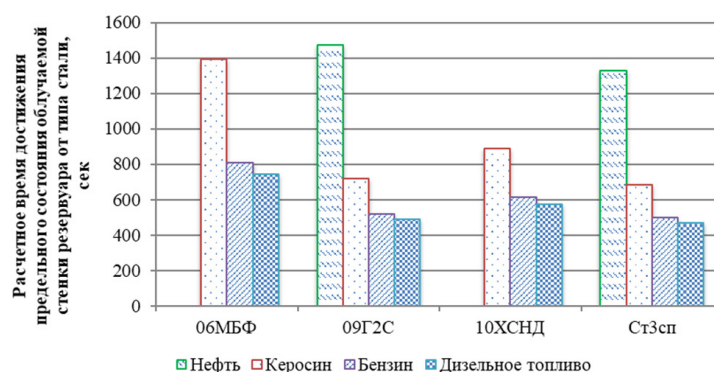


Рисунок 3 – Время достижения предельного состояния стенки, оцениваемого из условий снижения значения предела текучести стали при температуре 600°C ($\sigma_m^{600^\circ\text{C}}/\sigma_m^{20^\circ\text{C}} \geq 0,6$)

Обсуждение. Результаты исследований показывают, что из представленных характеристик нефтепродукта, массовая скорость выгорания оказывает значительное влияние на количество теплоты, выделяемой в результате пожара.

На рисунках 4 и 5 представлены зависимости, демонстрирующие динамику снижения значений предела текучести сталей 06МБФ и СтЗсп.

Видно, что резкое снижение показателя предела текучести стенки из стали 06МБФ наблюдается при воздействии тепловых потоков от горящего бензина и дизельного топлива:

- с ~343 до 163 МПа;
- с ~ 326 до 138 МПа соответственно за ~1360 секунд. Для стали СтЗсп снижение прочностных показателей значительно сильнее.

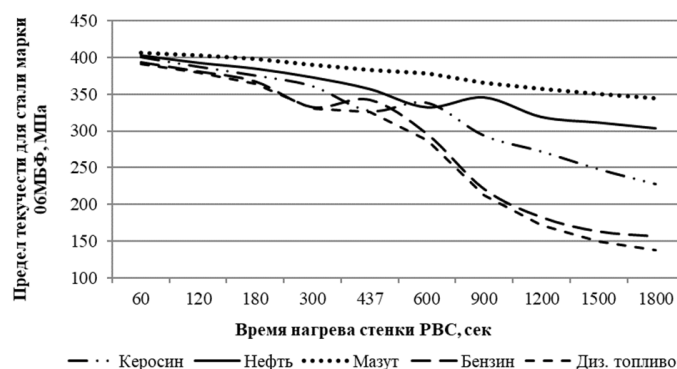


Рисунок 4 – График зависимости предела текучести стали 06МБФ от времени нагрева стенки РВС 10000 различными типами веществ

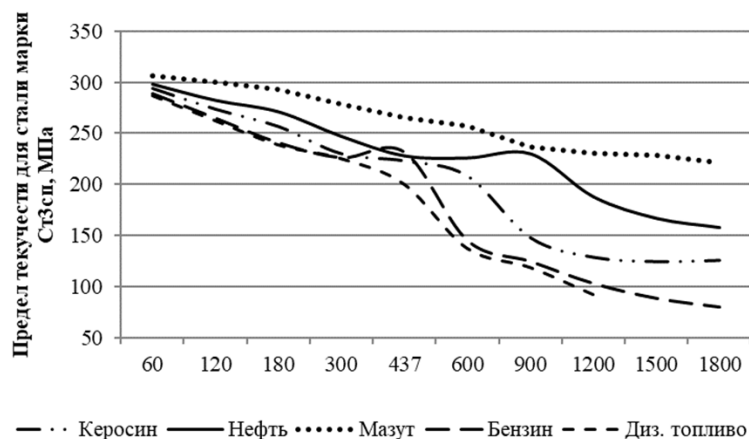


Рисунок 5 – График зависимости предела текучести стали Ст3сп от времени нагрева стенки РВС 10000 различными типами веществ

Выводы. Представлены расчетные данные по оценке времени достижения предельных состояний конструктивных элементов вертикального стального резервуара (различных марок сталей), содержащего нефтепродукт, в условиях теплового воздействия. В качестве топлива, сгораемого в условиях пожара, были рассмотрены: мазут, бензин, керосин, нефть и дизельное топливо. Показано, что наиболее быстро предельные состояния по прочности стенки стального резервуара достигаются при горении дизельного топлива. Наиболее предпочтительным материалом резервуара из рассмотренных марок сталей являются стали 06МБФ и 10ХСНД.

Вышеизложенные данные представляют практический интерес при проектировании резервуарных парков и для расчета времени сил и средств, прибывающих для ликвидации чрезвычайной ситуации разработке документации предварительного планирования.

Дальнейшие исследования, направленные на определение распределения термических напряжений, а также процессов, теплопереноса целесообразно провести с использованием автоматизированного инженерного анализа на основе CAD-модели конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Швырков, С.А. Разрушения резервуаров и способы минимизации негативных последствий / С.А. Швырков // Технологии техносферной безопасности. – 2022. – № 3(97). – С. 8-24. – DOI 10.25257/TTS.2022.3.97.8-24.
2. Швырков, С.А. Анализ методов оценки площади пролива жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара / С.А. Швырков, В.В. Воробьев // Технологии техносферной безопасности. – 2023. – № 1(99). – С. 17-32. – DOI 10.25257/TTS.2023.1.99.17-32.
3. Men J., Chen G., Reniers G., Wu Y., Huang H. Experimental and numerical study on earthquake-fire coupling failure mechanism of steel cylindrical tanks // Reliability Engineering & System Safety. – 2024. – Т. 245. – С. 110016.
4. Paula H.M. Insights from 595 tank farm fires from around the world // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – Т. 171. – С. 773-782.
5. Швырков, С.А. Предотвращение каскадного развития пожара на тепловых электростанциях Вьетнама на

основе применения резервуаров с защитной стенкой и волноотражающим козырьком / С.А. Швырков, К.Т. Буй // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 3. – С. 119-129.

6. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – Т. 146. – С. 670-685.

7. Минкин, Д.А. Тепловой режим защитной стенки цилиндрического резервуара в условиях пожара / Д.А. Минкин, М.А. Яндиев // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – 2020. – № 1. – С. 33-39.

8. Wang J. Wang M., Yu X., Zong R., Lu S. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – Т. 159. – С. 1203-1214.

9. Li Y., Jiang J., Yu Y., Wang Z., Xing Z., Zhang Q. Thermal buckling of oil-filled fixed-roof tanks subjected to heat radiation by a burning tank // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Т. 138. – С. 106393.

10. Wu Z., Hou L., Wu S., Wu X., Liu F. The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire // Fire safety journal. – 2020. – Т. 117. – С. 103192.

11. Kumar M.D., Sengottaiyan S., Ramasamy M. Thermal and electrical properties of coated fiber-reinforced polymer composites // Surface Modification and Coating of Fibers, Polymers, and Composites. – Elsevier, 2025. – С. 447-475.

12. Gahane S., Mestry S., Mhaske S. T. Exploring the Frontiers and Hurdles of Phosphorus-Based Intumescent Flame-Retardant Polyurethane: A Comprehensive Journey // Polymer-Plastics Technology and Materials. – 2025. – С. 1-44.

13. Рахматов, Э.А. Анализ условий эксплуатации металлоконструкций и пути увеличения срока службы производственных оборудования нефтегаза применением гетероконструктивных материалов / Э.А. Рахматов // Университетские науки. – 2023. – № 11-2(116). – С. 20-25.

14. Yang R., Wang Z., Jiang J., Shen S., Sun P., Lu Y. Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion // Engineering failure analysis. – 2020. – Т. 108. – С. 104342.

15. Шахабов, М.М. Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации / М.М. Шахабов, А.Б. Сивенков, Д.А. Корольченко // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 6. – С. 864-879.

16. Комиссаров А.А. Сравнительная огнестойкость современных строительных сталей / А.А. Комиссаров, С.М. Тихонов, Д.В. Тен, М.Ю. Матросов, П.А. Глухов, А.В. Пехотиков, Д.В. Кузнецов // Сталь. – 2021. – № 11. – С. 40-45.

17. Комиссаров А.А. Анализ использования огнестойкого проката С390П для изготовления строительных металлоконструкций / А.А. Комиссаров, С.М. Тихонов, Д.В. Тен, М.Ю. Матросов, П.А. Глухов, А.В. Пехотиков, В.В. Павлов, Р.Р. Адигамов, П.А. Мишнев, Д.В. Кузнецов // Сталь. – 2022. – № 12. – С. 54-58.

18. Голованов В.И. Исследование механических

свойств современного металлопроката строительного назначения при повышенных температурах / В.И. Голованов, Г.И. Крючков, А.Н. Стрекалев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31, № 2. – С. 52-62. – DOI 10.22227/0869-7493.2022.31.02.52-62.

19. Zhang Z., Zonga R., Taoc C., Rena J., Lua S. Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances //Process Safety and Environmental Protection. – 2020. – Т. 139. – С. 182-190.

20. Михайлин, П.О. Анализ влияния интенсивного теплового потока, выделяемого в группе резервуаров в резервуарном парке / ПО. Михайлин, М. М. Данилов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2023. – № 2(29). – С. 132-142. – DOI 10.34987/vestnik.sibp-sa.2023.77.34.008.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 614.849

EDN: LUPBVW

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПРОЛИВА
НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА
И ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РАСЧЁТА ПОЖАРНОГО РИСКА**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3914-0938

AuthorID: 842491

ORCID: 0000-0001-7531-9655

ScopusID: 57202993686

ШАРАФУТДИНОВ Азат Амирзагитович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Пожарная и промышленная безопасность»
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(450064, Россия, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: azat_sharaf@mail.ru)

ГОРБАЧЁВ Семён Викторович, аспирант
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(450064, Россия, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: sashaball@mail.ru)

БАЛЫКЛОВ Александр Алексеевич, аспирант
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(450064, Россия, Республика Башкортостан, город Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: sashaball@mail.ru)

ШАРАФУТДИНОВА Анжела Азатовна, студент
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
(141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9,
e-mail: sharafutdinova.aa@phystech.edu)

Аннотация. Настоящая научная статья посвящена насущной проблеме – совершенствованию методик определения площади пролива нефтепродуктов. В фокусе исследования – разработка лабораторных стендов, имитирующих реальный технологический трубопровод и сравнительный анализ фактических результатов экспериментов с результатами использования инженерного программного обеспечения для. Цель – проведение серии контролируемых экспериментов и, как следствие, совершенствование существующих подходов к оценке площади пролива нефтепродуктов. Статья представляет собой критический анализ существующих методик, выявляя отсутствие единого, общепризнанного подхода. Этот пробел подчеркивает необходимость дальнейших, углубленных исследований в данной области, что придает работе особую актуальность. В рамках исследования был проведен всесторонний обзор как существующих методик оценки площади пролива, так и доступного инженерного программного обеспечения. Определены ключевые параметры для собственной лабораторной модели, и предприняты практические шаги по ее сборке, опирающиеся на прочный теоретический фундамент. Авторы предлагают использовать компьютерное моделирование для точной настройки параметров лабораторной установки, что позволит провести серию экспериментов по определению площади пролива нефтепродуктов, а затем физически реализовать предложенную установку. Представлены результаты экспериментов, демонстрирующие возможности совершенствования существующей методики, регламентированной нормативными документами. Проведены расчеты, основанные на действующей нормативной базе, которые доказывают потенциальную эффективность предложенных нововведений при их внедрении в нормативную документацию. Таким образом, данная работа способна внести значительный вклад в совершенствование методов оценки площади пролива жидкости при аварийных ситуациях на технологических трубопроводах. Это, в свою очередь, поможет предотвратить катастрофический ущерб для окружающей среды и здоровья людей, повысит точность расчета пожарного риска для производственных объектов и, как следствие, значительно повысит уровень пожарной безопасности на объектах, связанных с обращением нефтепродуктов.

Ключевые слова: методы оценки, инженерное программное обеспечения, аварийные ситуации, пожарная безопасность, пролив нефтепродуктов, пожарный риск.

**IMPROVING THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OIL
SPILL AREA DURING PROCESS PIPELINE DEPRESSURIZATION AND INCREASING
THE RELIABILITY OF FIRE RISK CALCULATIONS**

© The Author(s) 2025

SHARAFUTDINOV Azat Amirzagitovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department «Fire and industrial safety»
Ufa State Petroleum Technical University
(450064, Russia, Ufa, st. Cosmonauts, d. 1; e-mail: azat_sharaf@mail.ru)
GORBACHYOV Semyon Viktorovich, post-graduate student
Ufa State Petroleum Technical University

(450064, Russia, Ufa, st. Cosmonauts, d. 1; e-mail: Semyon.gorbachev.2000@gmail.com)

BALYKLOV Alexander Alekseyevich, post-graduate student

Ufa State Petroleum Technical University

(450064, Russia, Ufa, st. Cosmonauts, d. 1; e-mail: sashaball@mail.ru)

SHARAFUTDINOVA Anzhela Azatovna, student

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

(141701, Russia, Moscow region, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9; e-mail: sharafutdinova.aa@phystech.edu)

Abstract. This scientific article is devoted to an urgent problem – the improvement of methods for determining the area of oil spill. The research focuses on the development of laboratory stands that simulate a real technological pipeline and a comparative analysis of the actual experimental results with the results of using engineering software for. The goal is to conduct a series of controlled experiments and, as a result, improve existing approaches to estimating the area of oil spill. The article presents a critical analysis of existing techniques, revealing the lack of a unified, universally recognized approach. This gap highlights the need for further, in-depth research in this area, which makes the work particularly relevant. As part of the study, a comprehensive review was conducted of both existing methods for estimating the area of the strait and available engineering software. The key parameters for our own laboratory model have been identified, and practical steps have been taken to assemble it based on a solid theoretical foundation. The authors propose using computer modeling to fine-tune the parameters of the laboratory installation, which will allow conducting a series of experiments to determine the area of oil spill, and then physically implement the proposed installation. The results of experiments are presented, demonstrating the possibilities of improving the existing methodology, regulated by regulatory documents. Calculations based on the current regulatory framework have been carried out, which prove the potential effectiveness of the proposed innovations when they are introduced into regulatory documentation. Thus, this work can make a significant contribution to the improvement of methods for estimating the area of liquid spillage in emergency situations on technological pipelines. This, in turn, will help to prevent catastrophic damage to the environment and human health, increase the accuracy of calculating fire risk for production facilities and, as a result, significantly increase the level of fire safety at facilities associated with the circulation of petroleum products.

Keywords: assessment methods, engineering software, emergency situations, fire safety, oil spill, fire risk.

Для цитирования: Шарафутдинов А.А. Совершенствование методики определения площади пролива нефтепродуктов при разгерметизации технологического трубопровода и повышение достоверности расчёта пожарного риска / А.А. Шарафутдинов, С.В. Горбачёв, А.А. Балыков, А.А. Шарафутдинова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 243-252. – EDN: LUPBVW.

Введение. Разлив нефти на технологических трубопроводах – одна из часто происходящих аварийных ситуаций, несущих серьезную угрозу для жизни и здоровья людей, экологический и материальный ущерб.

Ежегодно на объектах с обращением нефтепродуктов, как на нефтеперерабатывающих заводах, так и на трубопроводном транспорте, происходят аварии, которые сопровождаются разгерметизацией оборудования и выбросом наружу нефтепродукта, с последующим его воспламенением или же без него [1].

Существует ряд работ по данной теме, которые дают представление о том, что действующие нормативные методы определения площади пролива охватывают не все параметры процесса, а также имеют результирующие расхождения с другими известными методами по определению площади пролива, эти обстоятельства настоятельно диктуют необходимость проведения новых, углубленных исследований.

Существующий метод по определению площади пролива нефтепродукта, представленный в приказе МЧС от 26 июня 2024 года № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (далее – Методика) не учитывает некоторые важные

параметры такие как [2]:

1. Характер выброшенного вещества, так как нефтепродукты с разной вязкостью, летучестью паров и т.п. будут иметь разную площадь разлива [3].
2. Характер поверхности, её уклон, а также отсутствие учета некоторых распространённых поверхностей, например, песок или гравий [4].

Включение указанных выше параметров в методику позволит повысить точность расчёта площади пролива, а как следствие и достоверность расчёта пожарного риска для производственных объектов.

Существует ряд научных работ, посвящённых исследуемой проблеме, которые содержат как сравнение существующих методов, так и предложенные авторские подходы [5]. Однако каждый из данных методов опирается на различные группы параметров и формы их представления. В связи с этим целесообразно проведение дальнейших исследований по разработке методики, которая позволит расширить перечень учитываемых параметров при сохранении удобства восприятия и простоты формы представления, характерных для исходной Методики [7, 8].

Методология. За прошедший 2024 год в России произошло 347210 пожаров [6], в которых погибло 7545 и пострадало 8372 человек, а прямой

ущерб составил 16248694 тыс. рублей. Из общего числа пожаров 20 произошло на объектах нефтепереработки, к этому числу нужно так же добавить и разливы, которые произошли не только на крупных предприятия, а также те, которые, к счастью, не продолжились возгоранием. Это говорит о том, что очень важно уметь прогнозировать возможные аварии, связанные с разлитием нефтепродуктов, чтобы иметь представление о представляемом риске и количестве сил, нужных для ликвидации последствий [7, 8].

В определении величины поражающих факторов пожара пролива или просто масштабов загрязнения важнейшую роль играет количество пролитого вещества и соответственно площадь, на которую это вещество растечётся.

В настоящее время основой для подобных расчетов является методика, изложенная в приказе МЧС №533 [2]. Согласно данной методике, площадь пролива определяется как величина, прямо пропорциональная объему вытекшего продукта и коэффициенту разлития. При отсутствии конкретных данных или в случае пролива на не спланированную грунтовую поверхность коэффициент разлития принимается равным 5 м^{-1} ; при проливе на спланированное грунтовое покрытие – 20 м^{-1} ; при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие – 150 м^{-1} . Однако данный метод рассматривает грунтовые покрытия слишком обобщённо: например, обычный чернозём и глина обладают существенно различающимися коэффициентами фильтрации, что не учитывается в текущей методике.

В отчёте о НИР МИСИ им. В.В. Куйбышева [7, 8] автор установил, что влияние характера покрытия на площадь пролива увеличивается с увеличением объёма пролива.

Метод, основанный на публикациях Швыркова С.А. и Горячева С.А. [9], рассматривает убывание пролитой жидкости за счет испарения и впитывания в грунт, однако он применим исключительно для резервуаров. В работе Реута В.Ч., Тимофеева Н.В. и Перевощикова В.Н. [10] пролив жидкости анализировался исключительно на одну поверхность.

К тому же, многие методы описывают истечение

при постоянном расходе, однако, если рассматривать разгерметизацию трубопровода, нужно понимать, что истечение будет проходить в 3 этапа:

1. Снижение давления;
2. Отключение насоса и остаточная перекачка;
3. Остаточная перекачка после закрытия аварийных задвижек;

Еще одним нюансом является то, что при попытке рассчитать площадь разлива для одного и того же гипотетического объёма продукта, но разными методами, мы получим различные значения, некоторые из них отличаются друг от друга в 6-7 раз, что непременно оказывает влияние на радиус поражения и величину пожарного риска, подобные расчёты были представлены в [11].

В заключение, следует признать, что в исследуемой области отсутствует универсальный подход. Несмотря на выявленные важные закономерности, не существует всеобъемлющей методики, способной учесть все нюансы. Это говорит о необходимости дальнейших, более глубоких исследований, основанных на проведении натурных экспериментов.

Результаты. На первоначальном этапе исследований целесообразно проводить эксперименты на компактной лабораторной модели. В ходе разработки такой модели приоритетной задачей является определение оптимальных параметров трубопровода [12]. Характеристики реального технологического трубопровода во многом зависят от технологического процесса, в котором данный трубопровод участвует, но глобально на сути эксперимента это не скажется, поэтому возьмём значения геометрических параметров экспериментального участка по одному из реально существующих трубопроводов [13, 14]. Параметры представлены в таблице 1.

Вычисление значений рабочего давления и расхода на модельном трубопроводе, при котором установится подобный режим течения жидкости удобно и рационально произвести с помощью одного из программных комплексов.

В результате точных вычислений будет обеспечено динамическое и кинематическое подобие, что в итоге даст полное гидродинамическое соответствие между реальным и модельным трубопроводами [15].

Таблица 1 – Параметры натурного технологического трубопровода

№ п/п	Параметр трубопровода	Значение	Единица измерения
1	Длина участка технологического трубопровода	10	м
2	Диаметр технологического трубопровода	0,25	м
3	Диаметр аварийного отверстия (выбран по приказу МЧС РФ №533 согласно наибольшей частоте утечек для трубопровода данного диаметра)	0,0125	м
4	Расстояние от технологического трубопровода до земли (выбрано согласно п 6.24 СП 18.13330.2019)	при ширине группы труб менее 1,5 м - 0,35 при ширине группы труб 1,5 м и более – 0,5	м
5	Давление в трубопроводе	20	атм.
6	Часовая пропускная способность нефтепровода	150	м³/ч
7	Время истечения через отверстие	при авт. 120 ср. зн. 210 при ручн. 300	с с с

Существуют следующие варианты:

1. *SolidWorks* от французской компании *Dassault Systèmes*, это полноценный комплекс программ для 3D моделирования и автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, который в том числе способен просчитывать течение жидкости за счёт модуля *SolidWorks Flow Simulation*.

2. *Ansys* – это полноценный комплекс программ для инженерных расчетов и моделирования, подобно *SolidWorks*, широко используемый в США.

3. *FlowVision*. Данное программное обеспечение представлено отечественным разработчиком ТЕСИС. Его специфика заключается в более узкой направленности применения. Данное ПО решает задачи исключительно в области газогидродинамики и теплообмена, а также не содержит встроенного 3D редактора, т.е. работает с уже готовыми моделями. Но не стоит относить отсутствие 3D редактора к минусам, так как ТЕСИС выступает в партнерстве с другим отечественным разработчиком АСКОН, которому принадлежит широко распространённый *КОМПАС-3D*. В ходе данного сотрудничества *КОМПАС* получил новый модуль *KompasFlow*, который повторяет функционал *FlowVision*.

Наиболее оптимальным для выполнения цели исследования считаем использование модуля *KompasFlow* внутри программы *КОМПАС-3D*, так как это дает одновременно возможность как создания моделей, так и просчёта гидродинамических характеристик в этих моделях.

Первым этапом в рамках работы с комплексом *КОМПАС-3D* будет создание 2 моделей:

1. Модель натурального трубопровода;
2. Модель лабораторного трубопровода.

Вторым этапом исследования является обработка моделей в среде *KompasFlow*. При работе с натуральной моделью известны все исходные параметры, которые вводятся в соответствующие поля программного обеспечения для запуска расчётного процесса. В результате моделирования формируется визуализация с графическим распределением скоростей и направлений течения жидкости внутри трубопровода (рис. 1, 2).

Следует подчеркнуть, что на полученных визуализациях цвета отражают не абсолютные значения скоростей, а относительное соотношение скоростных величин в каждой точке трубопровода, что свидетельствует об установлении определённого режима течения.

Принципиальная схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.

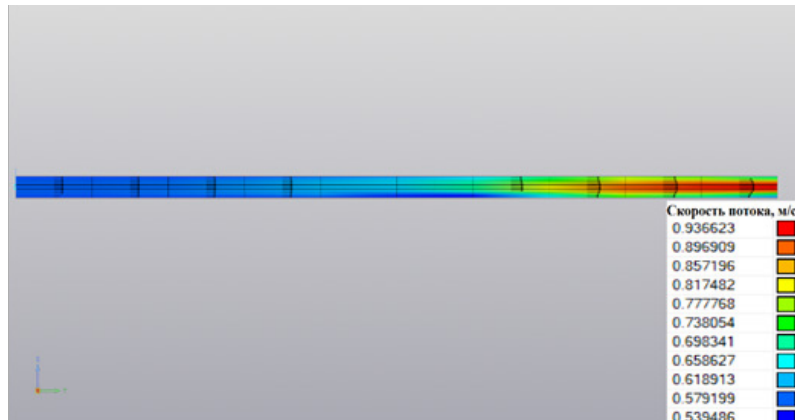


Рисунок 1 – Режим течения жидкости реального трубопровода

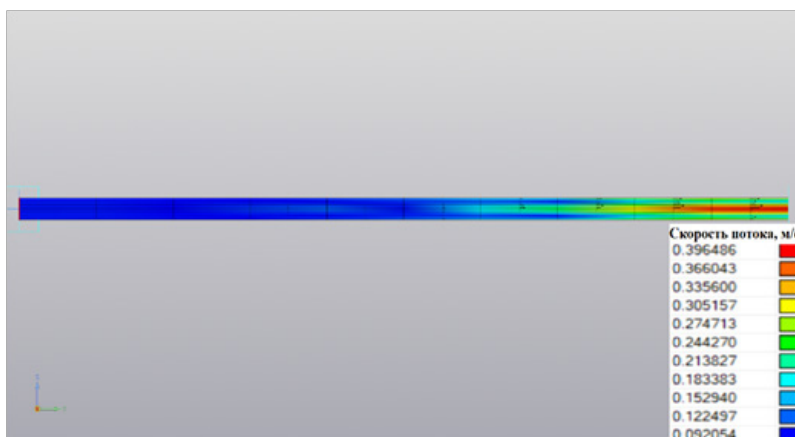


Рисунок 2 – Режим течения жидкости модельного трубопровода

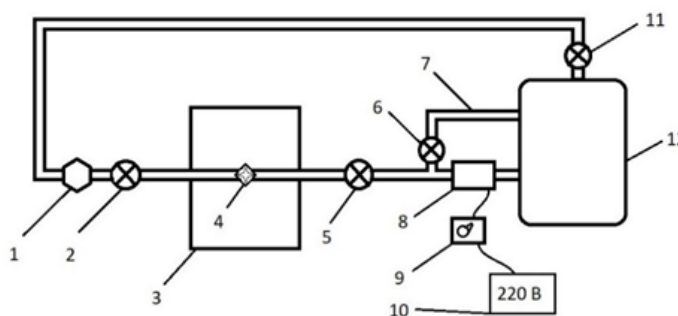


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки

1 – манометр; 2, 5, 6, 11 – вентиль; 3 – поддон с исследуемой поверхностью; 4 – место утечки; 7 – обратная магистраль; 8 – насос; 9 – регулятор напряжения; 10 – источник питания; 12 – ёмкость с исследуемым нефтепродуктом

Для проведения экспериментальных исследований в рамках данной работы был разработан лабораторный стенд, предназначенный для анализа площадей пролива нефтепродуктов. Стенд обладает возможностью точной настройки технологических параметров, что обеспечивает установление необходимого режима течения для каждого конкретного экспериментального условия [16].

В целях повышения точности оценки площади пролива была осуществлена серия экспериментов, направленных на усовершенствование существующих методик. В частности, в расчетную модель введён коэффициент уклона поверхности,

расширен перечень типов поверхностей, а также исследовано влияние типа пролитого нефтепродукта на конечное значение площади пролива.

В ходе экспериментов выполнялись эксперименты с нефтью, дизельным топливом и бензином на подготовленные и неподготовленные поверхности – песок и гравий. В процессе испытаний также изменялись значения уклона поверхности и объёмы проливаемого вещества, что позволило комплексно оценить влияние указанных параметров на характер и площадь пролива.

Полученные значения представлены в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2 – Результаты экспериментов с дизельным топливом

Объём $V_{ж}$, мл	Поверхность	Уклон, %	Площадь $F_{пр}$, см ²
50	Грунт	0	16; 16,5; 15,25
100		0	28,25; 30,5; 29,25
150		0	38,25; 50; 42
50		5	19,95; 18,75; 20,5
100		5	33; 34,25; 35,75
150		5	43; 58; 59,25
50		10	29; 37,5; 33,75
100		10	50; 70,75; 66,75
150		10	62; 102; 94,25
50		0	38; 39,5; 38,5
100	Грунт подготовленный	0	65; 63,5; 64,25
150		0	78,25; 85,5; 83,5
50		5	51; 52,5; 53,5
100		5	95; 87,5; 91
150		5	104; 107,25; 105,25
50		10	60; 66; 67,5
100		10	103,75; 102; 105,75
150		10	136,75; 134,75; 140,25
50		0	5,5; 6; 4,5
100		0	10,5; 10; 9
150	Песок	0	14,75; 17,5; 18,75
50		5	7,5; 4,5; 6,4
100		5	13,25; 12,75; 13,75
150		5	21; 24,25; 24
50		10	13,75; 16,5; 16,25
100		10	25,75; 24,5; 24,25
150		10	28,25; 25,75; 29,5
50		0	10; 11; 20
100		0	20; 20,25; 18,75
150		0	16,5; 20,5; 19
50	Гравий	5	19; 19,5; 20,75
100		5	19; 19,75; 18,25
150		5	22,25; 18,5; 19,25
50		10	19; 19,5; 21
100		10	21,5; 20,75; 18,75
150		10	14,25; 21,75; 17,5

Таблица 3 – Результаты экспериментов с бензином АИ-92

Объём $V_{ж}$, мл	Поверхность	Уклон, %	Площадь $F_{пр}$, см ²
50	Грунт	0	23,75; 20; 21,75
100		0	63,5; 63,75; 66
150		0	78,5; 89; 85,25
50		5	23,75; 28,75; 27,25
100		5	70; 72; 73,5
150		5	91; 100; 97,25
50		10	33; 32,5; 33,5
100		10	73,5; 80; 71,5
150		10	120; 110; 113,5
50		0	52,75; 51,5; 52,5
100	Грунт подготовленный	0	73,75; 88,5; 76,75
150		0	104; 105,75; 95,75
50		5	56,25; 64; 62,75
100		5	78,5; 100,25; 96,75
150		5	104; 122,5; 112,75
50		10	70,75; 72,25; 66,25
100		10	85; 88; 101
150		10	122,5; 120,25; 121,5
50		0	12,5; 7,5; 10,75
100		0	38,25; 28,25; 33,5
150	Песок	0	44,25; 40; 43,25
50		5	12,5; 12,5; 14
100		5	39; 40,75; 40
150		5	54; 51,5; 53,25
50		10	19,75; 38,25; 23,25
100		10	59,5; 63,5; 61,75
150		10	87,5; 95; 88,5
50		0	30; 30; 27,5
100		0	42; 30; 31,25
150		0	36; 37,5; 30
50	Гравий	5	25; 42; 33,5
100		5	31,25; 41,5; 27,5
150		5	32,5; 129,25; 30,75
50		10	26,5; 33,5; 31,75
100		10	31; 30; 30
150		10	24,5; 38,5; 27,5

Таблица 4 – Результаты экспериментов с нефтью

Объём $V_{ж}$, мл	Поверхность	Уклон, %	Площадь $F_{пр}$, см ²
50	Грунт	0	33,75; 26; 32,25
100		0	50; 53,25; 54,25
150		0	63,5; 64,75; 66,25
50		5	61,75; 58,25; 63,5
100		5	77; 76,25; 79,5
150		5	102; 114; 107
50		10	72,5; 77,5; 73,75
100		10	90; 91,25; 97,25
150		10	118,75; 122,25; 126
50		0	55; 55,75; 56,75
100	Грунт подготовленный	0	74,5; 69,5; 71,25
150		0	102; 103; 99,5
50		5	55; 58,75; 59,75
100		5	78,5; 81,5; 80,75
150		5	122,5; 120,75; 125,25
50		10	69; 72,25; 73,5
100		10	112; 114; 118,5
150		10	139; 133; 143,25
50		0	33; 30; 28,5
100	Песок	0	78,5; 52,5; 52
150		0	63,5; 69; 66,75
50		5	28; 39; 36,25
100		5	56,5; 71,75; 66,75
150		5	117; 111,25; 115
50		10	62,5; 63,5; 60,75
100		10	82,25; 84; 88,25
150		10	127,5; 131; 129
50		0	15; 7,5; 11,75
100	Гравий	0	19,25; 7,5; 16,5
150		0	15,75; 15; 14,5
50		5	14,25; 19,75; 15,75
100		5	10,5; 16,5; 16
150		5	15; 23,25; 17
50		10	13,5; 14,75; 12,25
100		10	17; 15,75; 16
150		10	15; 11,75; 17

На основе полученных данных были обновлены коэффициенты разлития для каждого вещества, объёма и уклона по формуле:

$$f_p^* = F_{пр} / V_{ж}, \quad (1)$$

где f_p^* – коэффициент разлития, м⁻¹;

$F_{пр}$ – площадь пролива, м²;

$V_{ж}$ – объём разлившейся жидкости, м³.

Зная коэффициенты разлития для групп испытаний, объединённых одним и тем же объёмом пролива, веществом и типом поверхности, но разным уклоном, можно определить влияние конкретного уклона на конечное значение площади пролива, для 5-% уклона по формуле:

$$\alpha_5 = f_{p5}^* / f_{p0}^*, \quad (2)$$

где α_5 – поправочный коэффициент для 5-% уклона;

f_{p5}^* – первичный коэффициент разлития, соответствующий опытам с 5-% уклоном, м⁻¹;

f_{p0}^* – первичный коэффициент разлития, соответствующий опытам с 0-% уклоном, м⁻¹.

И для 10-% уклона по формуле:

$$\alpha_{10} = f_{p10}^* / f_{p0}^*, \quad (3)$$

где α_{10} – поправочный коэффициент для 10-% уклона;

f_{p10}^* – первичный коэффициент разлития, соответствующий опытам с 10-% уклоном, м⁻¹;

f_{p0}^* – первичный коэффициент разлития, соответствующий опытам с 0-% уклоном, м⁻¹.

Перед сводом полученных данных в конечную таблицу, данные, полученные из 3 попыток для каждой группы испытаний, были приведены к среднему значению.

В результате предложенная в данной работе формула для определения площади пролива будет иметь следующий вид:

$$F_{пр} = f_p \cdot V_{ж} \cdot \alpha, \quad (4)$$

где $F_{пр}$ – площадь пролива, м²;

f_p – коэффициент разлития, м⁻¹;

$V_{ж}$ – объём разлившейся жидкости, м³;

α – поправочный коэффициент на уклон поверхности.

Значения всех постоянных коэффициентов представлены в таблицах 5, 6 и 7.

Для оценки эффективности предложенных положений был произведен сравнительный расчёт границ зон теплового поражения от пожара пролива и значений пожарного риска для сценария развития пожара пролива.

Расчёты проведены в соответствии с методикой, утверждённой приказом МЧС №533 [2], но для сравнения, значение площади пролива было определено также по формуле, представленной в этой статье.

Базовое сравнение проводится на примере нефти, а также предусматривается сравнительный анализ параметров для нефти и дизельного топлива на основе величин площади пролива, вычисленных по разработанной формуле, что позволит продемонстрировать значимость учета характера пролившегося вещества.

Значения среднеповерхностной плотности теплового излучения пламени, а также прочие фиксированные значения предлагается брать в нормативных и справочных документах [2, 17].

Сравнение определяемых величин представлено на рисунках 4 и 5.

Таблица 5 – Коэффициенты для дизельного топлива

Исследуемая поверхность	Коэффициент разлития f_p^* , м ⁻¹	Поправочный коэффициент для 5-% уклона α_5	Поправочный коэффициент для 10-% уклона α_{10}
Грунт	30	1,199	2,067
Грунт подготовленный	65	1,353	1,658
Песок	11	1,252	2,348
Гравий	20	1,171	1,160

Примечание – Прочерк «-» означает, что для данной группы значение отсутствует

Таблица 6 – Коэффициенты для бензина АИ-92

Исследуемая поверхность	Коэффициент разлития $f_p, м^{-1}$	Поправочный коэффициент для 5-% уклона α_5	Поправочный коэффициент для 10-% уклона α_{10}
Грунт	55	1,154	1,305
Грунт подготовленный	84	1,138	1,221
Песок	27	1,233	2,198
Гравий	38	1,013	0,733

Примечание – Прочерк «–» означает, что для данной группы значение отсутствует

Таблица 7 – Коэффициенты для нефти

Исследуемая поверхность	Коэффициент разлития $f_p, м^{-1}$	Поправочный коэффициент для 5-% уклона α_5	Поправочный коэффициент для 10-% уклона α_{10}
Грунт	52	1,715	2,035
Грунт подготовленный	84	1,118	1,409
Песок	53	1,649	1,869
Гравий	16	1,212	1,106

Примечание – Прочерк «–» означает, что для данной группы значение отсутствует

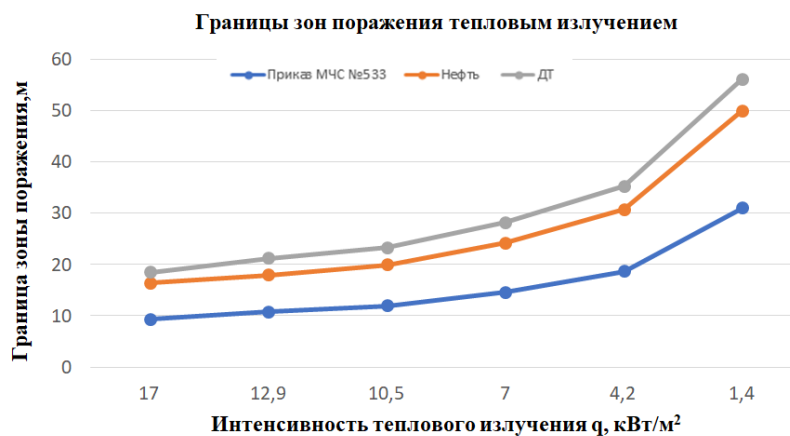


Рисунок 4 – Границы зон поражения тепловым излучением

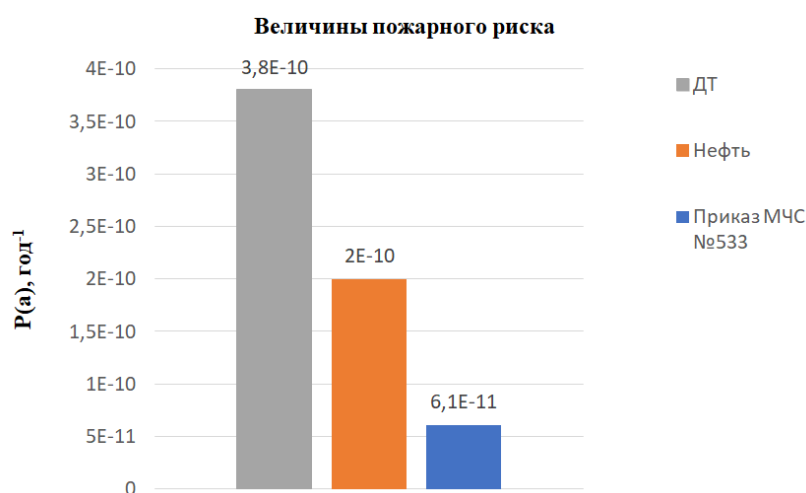


Рисунок 5 – Сравнение величин пожарного риска

Анализ графиков демонстрирует, что значения границ зон поражения отличаются в среднем на 65%, тогда как показатели пожарного риска варьируются более чем в три раза. При этом при использовании предложенной методики

определения площади пролива различия в значениях границ зон поражения для нефти и дизельного топлива составляют в среднем около 20%, а показатели пожарного риска отличаются в два раза.

Обсуждение. В рамках настоящего исследования была разработана экспериментальная лабораторная модель для определения площади пролива нефтепродуктов в условиях разгерметизации технологического трубопровода. Для достижения поставленных целей применялись современные инженерные программные средства, что существенно повысило точность и эффективность расчетных процедур [18].

В ходе работы использовались различные методы моделирования, включая гидродинамические расчеты, численные методы и анализ влияния параметров трубопровода на размеры пролива. Сравнение полученных результатов с данными, представленными в работах [9] и [11], показало, что вычисленные площади пролива соответствуют ожидаемым значениям, что подтверждает корректность используемых методик и надежность применяемых программных средств.

Отличительной особенностью разработанной модели является учет не только давления и температуры в трубопроводе, но и физико-химических свойств нефтепродуктов, что позволяет получать более точные оценки. В то же время результаты по площади пролива совпадают с данными других авторов, что свидетельствует о универсальности предложенного подхода [19].

Разбор и анализ полученных результатов показали, что важнейшими факторами, влияющими на площадь пролива, являются скорость разгерметизации и давление в трубопроводе. При этом, использованные программные продукты продемонстрировали высокую степень адекватности в моделировании различных сценариев разгерметизации.

Анализ полученных данных показал, что наиболее значимыми факторами, влияющими на размеры пролива, являются скорость разгерметизации и давление в системе. Используемое программное обеспечение показало высокую адекватность моделирования различных сценариев аварийных ситуаций. Обобщая результаты, можно отметить, что они находятся в диапазоне с аналогичными исследованиями, что свидетельствует о валидности проведенной работы. Проведенная в рамках исследования верификация и валидация моделей подтвердили их надежность и соответствие реальным ситуациям, что отличает данное исследование от ряда аналогичных работ, в которых такая проверка часто отсутствует.

Область моделирования процессов разгерметизации трубопроводов обладает значительным потенциалом для дальнейших исследований и усовершенствования. Разработка высокоточных моделей способствует улучшению практических рекомендаций по предотвращению и минимизации последствий аварийных ситуаций на трубопроводном транспорте нефтепродуктов.

В рамках текущего исследования также была

разработана методика повышения достоверности оценки пожарного риска, связанного с проливом нефти и нефтепродуктов, основные результаты которой основаны на экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях.

Использованные в рамках работы подходы к определению площади пролива включают как физические, так и математические модели, основанные на гидродинамических расчетах и экспериментальных данных. Кроме того, предложенная методика может оказать влияние на смежные отрасли, связанные с исследованием инцидентов пролива нефти и нефтепродуктов [20].

Основные отличия результатов, выявленные при сравнительном анализе, состоят в том, что в наших расчетах учтены не только физико-химические свойства нефтепродуктов, но и динамика их распространения на различных поверхностях [2, 17, 21]. Это позволило значительно повысить точность расчетов по сравнению с упрощенными моделями, используемыми в других исследованиях. В некоторых случаях (например, у Кузнецова) результаты оказались близкими, что может свидетельствовать о наличии универсальных закономерностей при условии соблюдения определенных экспериментальных условий.

Обсуждая результаты, следует подчеркнуть, что предлагаемая методика демонстрирует высокую степень согласованности с экспериментальными данными [22, 23]. Анализ показывает, что применение современных расчетных методов позволяет минимизировать погрешности при оценке площади пролива, что имеет важное значение для повышения надежности прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций.

Обобщая представленные данные и оценивая достоверность полученных результатов, можно резюмировать, что разработанная методика базируется на широком экспериментальном материале и обеспечивает высокую точность расчетов. Проведенный анализ верификации экспериментальных данных подтвердил их надежность и актуальность. Применение различных методов обработки и сопоставления данных, отражающих разнообразные режимы разгерметизации, подчеркивает комплексность и значимость результатов для дальнейших научных исследований.

В контексте существующих знаний в области пожарной безопасности и оценки рисков результаты данного исследования занимают значимое место [24]. Они не только дополняют текущую научную базу, но и открывают перспективы для практического применения, в частности в разработке более эффективных систем предупреждения и управления пожарными рисками.

Выводы. В результате проведенного исследования было доказано, что использование инженерных программных продуктов значительно повышает точность расчета площади пролива

нефтепродуктов в условиях разгерметизации технологического трубопровода. Соответствие полученных результатов данным других исследований подтверждает адекватность выбранных методов и модели.

Разработка предложенной лабораторной модели открывает новые перспективы для дальнейших исследований в области экологии и безопасности нефтехимических производств. Полученные результаты могут стать основой для создания более эффективных систем мониторинга и предотвращения разгерметизации, что, в свою очередь, послужит снижению экологического риска и улучшению безопасности на предприятиях.

Представленная в статье работа по совершенствованию метода оценки площади пролива нефтепродуктов вносит в свой вклад в развитие нормативной базы обеспечения пожарной безопасности. Важность учёта новых характеристик: уклон поверхности, характер нефтепродукта, обобщена сравнительным расчётом.

Таким образом, предложенные инновационные подходы способствуют повышению достоверности расчёта пожарного риска, что должно повысить уровень пожарной безопасности на производственных объектах.

В результате проведенного исследования была предложена усовершенствованная методика определения площади пролива нефтепродуктов, основанная на экспериментальных данных. Сравнительный анализ показал, что новая методика значительно повышает достоверность расчёта пожарного риска в сравнении с традиционными подходами. Полученные результаты подчёркивают необходимость внедрения современных и более сложных методик в области пожарной безопасности, что, безусловно, будет способствовать эффективному совершенствованию мер по предотвращению и ликвидации последствий проливов нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Gazizov, A.M. Improvement of fire retardant properties of wood materials/ A.M. Gazizov, O.V. Kuznetsova, A.A. Sharafutdinov, K.M. Shaimuhametova/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia. – 2020. – С. 62014.
2. Приказ МЧС РФ от 26.06.2024 № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018610351, 10.01.2018. «Программа моделирования и расчета водопенных коммуникаций пожарных автоцистерн» Бахтизин Р.Н., Баулин О.А., Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф., Шарафутдинов А.А., Шайдуллин А.Т.
4. Пережогин, Д.Ю. Экспериментальное исследование параметров площади пролива / Д.Ю. Пережогин, А.В. Краснов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – №1 (7). – С. 173-174.
5. Халиков, В.Д. Совершенствование метода расчёта аварийного пролива нефти для технологических трубопроводов. дис.канд.техн.наук: 05.26.03 / Халиков, Вадим Данилович. – ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». – Уфа: – 2017. – 129 с.
6. https://soloncy24.gosuslugi.ru/dlya-zhiteley/novosti-i-reportazhi/novosti_313.html.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610352 РФ, 09.01.2014. «Исследование геометрических параметров разлива жидкостей на горизонтальных поверхностях» / В.В. Кокорин, С.В. Субачев, В.Д. Халиков (РФ).
8. Шарафутдинов, А.А. Разработка методики расчета параметров пожаров и разливов нефти/ А.А. Шарафутдинов, Ф.Ш. Хафизов, И.Ф. Хафизов, А.В. Краснов, А.В. Ахметгафизов, В.И. Закирова, А.Н. Хафизова// Материалы конференции АИП. 28. Сер. «28-я Российская конференция по математическому моделированию в естественных науках». – 2020. – С. 070004.
9. Швырков, С.А. Оценка площади загрязнения территории жидкими углеводородами / С.А. Швырков, С.А. Дедовцев, С.Н. Ушаков // Газовая промышленность. – 2008. – №619. – С. 14-16.
10. Швырков, С.А. Обеспечение пожарной безопасности нефтебаз ограничением разлива нефтепродуктов при разрушении вертикальных стальных резервуаров: дис.канд. техн. наук: 05.26.03 / Швырков Сергей Александрович. – Академия ГПС МВД России. – М.Б – 2001. – 180 с.
11. Алексеев, М.В. Исследование растекаемости огнеопасных жидкостей по твердым поверхностям / М.В. Алексеев, Ю.П. Чаусов, Р.В. Вильданов, И.Г. Карамов // Противопожарная техника и безопасность: Сб. науч. тр. – М.: ВИПТШ МВД СССР, – 1978. – Вып. 4. – С. 31-36.
12. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021610493, 14.01.2021. «Программа для визуализации и получения аналитического решения многокритериальных задач» Валиев Р.Р., Баулин О.А., Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф., Альмухаметов А.А., Шарафутдинов А.А., Шарафутдинов А.А.
13. Fire Safety external audit procedure/ Sharafutdinov A.A., Krasnov A.V. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020. IOP Publishing Ltd, 2021. – С. 052011.
14. Златов, Б.С. Задачи планирования для мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов/ Б.С. Златов, Л.Х. Зарипова, И.К. Бакиров / В сборнике: Актуальные проблемы обеспечения пожарной, аварийной и экологической безопасности объектов. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Уфа, 2024. – С. 79-80..
15. Мамбетов, Р.Ф. Анализ типовых сценариев возникновения и развития пожаров, условия и результаты проведенных расчетов по оценке пожарного риска трубопровода транспорта газа/ Р.Ф. Мамбетов, Ф.Ш. Хафизов, И.Ф. Хафизов, В.М. Кушнаренко, Л.В. Сорокина, Ю.М. Габбасова// Безопасность жизнедеятельности. – 2025. – № 3 (291). – С. 40-45.
16. Хафизов, И.Ф. Предупреждение пожароопасных ситуаций на промышленных трубопроводах/ И.Ф. Хафизов, Т.В. Латыпова, Ф.Ш. Хафизов., И.В. Озден// Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2024. – № 4. – С. 20-36.
17. Корольченко, А.А., Корольченко, Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средств их тушения. Справочник: в 2-х ч. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Асс. «Пожнаука», 2004. – Ч. 1 – 713 с. – Ч. 2 – 774 с.
18. Improvement of Fire risk Calculation method for linear part of main pipeline/ D.V. Vasiliev, I.V. Ozden.// В сборнике: AIP Conference Proceedings. Proceedings of the IV International Scientific Conference on Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering: (MIST: Aerospace-IV 2021). AIP PUBLISHING, 2023. – С. 050047.
19. Creation of a platform for an information and analytical system for ensuring the activities of operational firefighting headquarters / Sharafutdinov A.A., Kh Pavlova Z., Sharafutdinova A.A.// В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk, 2022. – С. 042020.
20. Хафизов, И.Ф. Применение ингибитора коррозии для повышения безопасности промысловых трубопроводов/ И.Ф. Хафизов, С.Ф. Урманчеев, Ф.Ш. Хафизов, О.Д. Халикова, Р.М. Султанов, А.А. Шарафутдинов, И.В. Озден// Технологии техносферной безопасности. – 2017. – № 2 (72). – С. 93-97.

21. Валиуллина, Р.А. Определение безопасных противопожарных расстояний между зданиями с использованием трехмерного моделирования в PYROSIM/ Р.А. Валиуллина, А.А. Шарафутдинов// Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2023. – № 1. – С. 17-30.

22. Валиуллина, Р.А. Трехмерное моделирование в задачах расчёта и визуализации распространения опасных факторов пожара при оценке пожарных рисков/ Р.А. Валиуллина, Л.Р. Аминова, А.А. Шарафутдинов// Нефтегазовое дело. – 2021. – № 4. – С. 4.

23. Evaluation of the Mobile Simulator for Fire Protection Training/ Khafizov F.S., Gazizov A.M., Khafizov I.F., Sharafutdinov A.M. // В сборнике: CEUR Workshop Proceedings. Сер. "CSASE 2018 – Proceedings of the Annual Scientific International Conference on Computer Systems, Applications and Software Engineering" 2018.

24. Ахметхафизов, А.В. Инновационные методы и технологии для совершенствования обнаружения пожара/ А.В. Ахметхафизов, А.А. Шарафутдинов, А.А. Шарафутдинова// В сборнике: Современные пожаро-безопасные материалы и технологии. сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Иваново, 2023. – С. 29-34.

Статья поступила в редакцию 22.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 614.891

EDN: KIGKPW

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НОРМАТИВНОЙ ОБОСНОВАННОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ
В КОНТЕКСТЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**

© Авторы 2025

SPIN: 3760-4207

AuthorID: 403382

ПАЛАТИНСКАЯ Ирина Петровна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: palatinskaya@mail.ru)

SPIN: 5350-3579

AuthorID: 689956

ORCID: 0000-0002-8325-1598

ScopusID: 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. Во вредных условиях труда, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям, а также в условиях загрязненного воздуха, работает большое количество людей. В структуре профессиональной патологии профессиональных заболеваний, связанных с воздействием производственных химических факторов, в 2023 г. в Российской Федерации первое место занимают пневмокониозы (38,01%), второе – хроническая обструктивная болезнь легких (19,21%), третье – хронические бронхиты (12,34%). Одной из самых распространенных мер снижения числа профессиональных заболеваний является использование работниками средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). При этом причиной возникновения острых профессиональных заболеваний может являться несовершенство СИЗОД. С целью выявления причин несовершенства СИЗОД авторами статьи были проведены исследования по анализу требований нормативных документов Российской Федерации, предъявляемых к применению СИЗОД. Выявлено, что предъявляются разные требования к средствам защиты в группах антропометрических показателей. На этой основе и результатах опроса пользователей СИЗОД сделан вывод о необходимости проведения экспериментальных исследований по установлению влияния антропометрических показателей на защитные свойства СИЗОД. Эффективность СИЗОД можно оценить по полученным аналитическим выражениям.

Ключевые слова: загрязненный воздух рабочей зоны, средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД), нормативно правовые акты Российской Федерации (НПА).

**ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS AND REGULATORY VALIDITY OF THE USE
OF PERSONAL RESPIRATORY PROTECTION EQUIPMENT IN THE CONTEXT
OF OCCUPATIONAL SAFETY REQUIREMENTS**

© Authors 2025

PALATINSKAYA Irina Petrovna, candidate of technical sciences, docent,
associate professor of the Department "Life Safety"

South Ural State University (National Research University)
(454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76, e-mail: palatinskaya@mail.ru)

BOGDANOV Andrey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Department of Life Safety

South Ural State University (National Research University)
(454080, Russia, Chelyabinsk, Lenin Ave., 76, e-mail: bav-64@mail.ru)

Abstract. A large number of people work in harmful working conditions that do not meet sanitary and hygienic requirements, as well as in polluted air conditions. In the structure of occupational pathology of occupational diseases associated with exposure to industrial chemical factors, in 2023 in the Russian Federation, pneumoconiosis ranks first (38.01%), chronic obstructive pulmonary disease ranks second (19.21%), and chronic bronchitis ranks third (12.34%). One of the most common measures to reduce the number of occupational diseases is the use of personal respiratory protective equipment (PPE) by workers. At the same time, the cause of acute occupational diseases may be the imperfection of PPE. In order to identify the causes of PPE imperfection, the authors of the article conducted research to analyze the requirements of regulatory documents of the Russian Federation imposed on the use of PPE. It was revealed that different requirements are imposed on protective equipment in groups of anthropometric indicators. Based on this and the results of the survey of PPE users, a conclusion was made on the need to conduct experimental studies to establish

the influence of anthropometric indicators on the protective properties of PPE. The effectiveness of PPE can be assessed using the obtained analytical expressions.

Keywords: contaminated air in the working area, personal respiratory protective equipment (PPE), regulatory legal acts of the Russian Federation (RLA).

Для цитирования: Палатинская И.П. Оценка эффективности и нормативной обоснованности применения средств индивидуальной защиты органов дыхания в контексте требований безопасности труда / И.П. Палатинская, А.В. Богданов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 253-259. – EDN: KIGKPW.

Введение. Анализ статистических данных государственных докладов Российской Федерации по результатам случаев острого профессионального заболевания (отравления) в период с 2014 по 2023 гг., связанными с дыхательными системами выявил, что:

- число случаев в 2023 г. по сравнению с 2014 г. выросло в 5,6 раз (234 и 42, соответственно);
- в 2023 г. число смертельных исходов острой профессиональной патологии выше показателя 2014 г. в 5 раз (15 и 3, соответственно);
- в 2023 г. удельный вес острых проф. заболеваний и отравлений в 11,3 раза выше показателя 2014 г. (5,7% – 234 случая);
- в 2023 г. вырос по сравнению с периодом 2014-2019 гг. и удельный вес случаев с впервые установленным диагнозом острого проф. заболевания (отравления);
- почти на том же уровне остается доля случаев хронических проф. заболеваний (отравлений). В 2023

г. она составила 94,33%, а в 2014 г. 99,5% [1-10].

На основе представленных цифр построена диаграмма (рис. 1).

Структура основных форм проф. патологий профессиональных заболеваний из-за воздействия промышленных аэрозолей и химических веществ в Российской Федерации за 2014 г. по 2020 г. представлена на рисунке 2. Данные с 2021-2023 гг. в докладах [1-10] отсутствуют.

По результатам расследований случаев острых профессиональных заболеваний в структуре основных обстоятельств из-за загрязнений воздушной среды воздуха рабочей зоны за период 2014-2023 гг. в Российской Федерации, установлено, что основными причинами их развития остается несовершенство СИЗОД (рис. 3). Поэтому решение вопросов, направленных на совершенствование СИЗОД и оценку их эффективности, является актуальным.



Рисунок 1 – Структура форм проф. заболеваний (отравлений) за период 2014–2023 гг., %

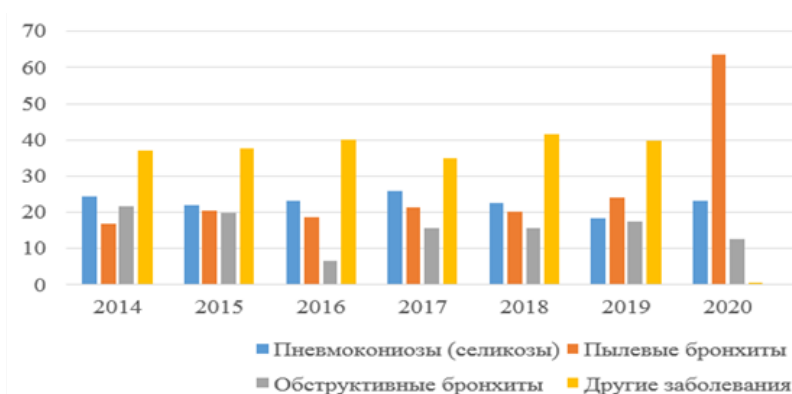


Рисунок 2 – Структура основных форм проф. патологии из-за воздействия промышленных аэрозолей, %

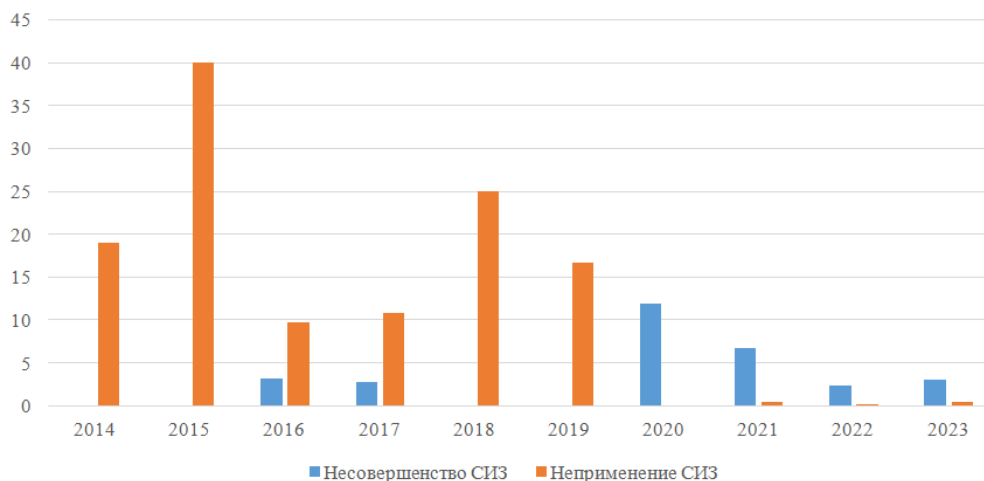


Рисунок 3 – Структура основных обстоятельств и условий возникновения острых профессиональных заболеваний, %

Методология. Для снижения количества профессиональных заболеваний (рис. 1, 2) используются средства индивидуальной защиты органов дыхания (далее СИЗОД). Они повышают безопасность работников при концентрациях вредных веществ в воздухе рабочей зоны выше предельно допустимых, обеспечивая полную или частичную очистку воздуха.

На отечественном рынке в настоящее время для работников представлен огромный выбор современных СИЗОД разного назначения и разных степеней защитных свойств. Задачи, связанные с оценкой эффективности средств индивидуальной защиты, продолжают оставаться очень актуальными, во-первых, из-за наличия в нашей стране большого ассортимента СИЗОД, во-вторых, постоянно растущих расходов работодателей на приобретение нужных для разных видов работ СИЗ, в-третьих, остающегося в нашей стране высокого уровня профессиональной заболеваемости (рис. 1, 2), в-четвертых, продолжает оставаться одной из причин проф. заболеваемости несовершенство применяемых СИЗ (рис. 3) [1-20]. Поэтому объектом исследования данной статьи является анализ требований к СИЗОД фильтрующего действия (далее СИЗОД ФД).

С целью выявления причин несовершенства данных типов СИЗОД были выбраны следующие методы исследования – это сравнение и абстрагирование. Применение данных методов исследования позволит:

- выявить группу нормативно правовых актов Российской Федерации (далее – НПА) определяющих и регулирующих различные требования безопасности для средств защиты органов дыхания;
- сопоставить и проанализировать выявленные требования и их особенности;
- выявить отличительные особенности в требованиях безопасности к СИЗОД, содержащихся в НПА.

Сравнение и абстрагирование. Законодательст-

во Российской Федерации обязывает работодателей обеспечивать работников, которые подвергаются воздействию вредных производственных факторов (статья 219, статья 221 [11]), средствами индивидуальной защиты. Так, при выборе СИЗОД работодатель должен ориентироваться не только на вредные вещества, находящиеся в воздухе рабочей зоны, но и на длительность пребывания работника в такой среде, а также на особенности выполнения его работы в данном технологическом процессе.

Для выявления групп и показателей безопасности по требованиям и особенностям, предъявляемым к применению СИЗОД фильтрующего действия, были определены и проанализированы НПА их регулирующие. Для этого были отобраны двенадцать действующих в настоящее время документов, требования которых применяют производители СИЗ органов дыхания в Российской Федерации, а также требования, указанные в сопровождающихся документах СИЗОД [12-23]. При этом все СИЗОД подразделяются на следующие типы:

- 1) изолирующие;
- 2) фильтрующие;
- 3) изолирующие-фильтрующие аппараты.

Классификация огромной группы СИЗОД фильтрующего действия, которая в большинстве применяется для работников в разных отраслях экономики нашей страны (респираторы, полумаски, маски, противогазы) представлена на рисунке 4.

Для всех СИЗОД предъявляются требования безопасности – номенклатура показателей качества. Они разбиты по группам, в которых имеются разные показатели. Некоторые из общих для всех СИЗОД групп и показателей представлены в таблице 1.

Также были проанализированы требования НПА [13-23] по антропометрическим показателям. По результатам анализа в таблице 2 и на рисунках 5 и 6 предоставлен перечень соответствующих показателей.

Таблица 1 – Перечень показателей по НПА [12-23]

Группа показателей	Наименование показателя
Показатели эксплуатационных свойств	– Материал фильтра; – Масса фильтров; – Соединение элементов; – Устойчивость к механическому воздействию – Определение времени защитного действия.
Показатели эффективности защиты	– Коэффициент защиты СИЗОД. – Коэффициент проникания через СИЗОД. – Коэффициент подсоса лицевой части СИЗОД. – Коэффициент проникания через фильтрующую часть СИЗОД. – Время защитного действия. – Устойчивость к запылению.
Эргономические требования	– Сопротивление воздушному потоку, оказываемое СИЗОД: на вдохе и на выдохе. – Сопротивление воздушному потоку, оказываемое фильтрующим элементом. – Температура вдыхаемого воздуха под лицевой частью СИЗОД. – Объемная концентрация углекислого газа во вдыхаемом воздухе. – Масса СИЗОД в комплекте. – Масса СИЗОД, создающая нагрузку на голову. – Поле зрения в СИЗОД. Ограничение площади поля зрения в СИЗОД. – Изменение остроты зрения в СИЗОД. – Разборчивость речи, работающего в СИЗОД. – Заглушение звуковой информации, оказываемое СИЗОД. – Снижение работоспособности при применении СИЗОД. – Клапаны выдоха и вдоха. – Габаритные размеры.
Эстетические показатели	Обобщенный эстетический показатель.
Показатели стандартизации и унификации	- Коэффициент применяемости. - Коэффициент взаимной унификации.

Таблица 2 – Перечень показателей по учету антропометрических требований в НПА [13-23]

НПА	Требования по соблюдению антропометрических показателей
ТР ТС 019/2011 [12]	Размер (при наличии);
ГОСТ 12.4.174–87 [13]	- Группа эргономических требований (таблица 1) и дополнительные показатели: – Число ростов (размеров) СИЗОД. – Механическое давление, оказываемое СИЗОД на лицо, наличие и степень "наминов".
ГОСТ Р 12.4.193-99 [14]	– Масса фильтров. – Соединение.
ГОСТ Р ИСО 7250–2007 [15]	Антропометрические данные по шести показателям (измерения головы) рисунок 5
ГОСТ 12.4.034-2017 [16]	–отсутствуют
ГОСТ 12.4.245-2013 [17]	–Масса фильтров. –Соединение.
ГОСТ 12.4.244–20 [18]	– Ремни крепления и/или оголовье. – Соединительные узлы. – Площади поля зрения. – Антропометрические данные по четырем показателям (измерения головы) рисунок 6.
ГОСТ 12.4.294-2015 [19]	– Ремни крепления и/или оголовье. – Площадь поля зрения.
ГОСТ 12.4.298–2015 [20]	- СИЗОД должны быть приспособлены для использования людьми с различными антропометрическими размерами: – эргономические требования по разным показателям: – масса СИЗОД. – степень ограничения зрения.
ГОСТ 12.4.299-2015 [21]	–отсутствуют
ГОСТ 12.4.300-2015 [22]	– Ремни крепления и/или оголовье. – Соединительные узлы. – Площади поля зрения.
ГОСТ Р 59959-2021. [23]	– отсутствуют

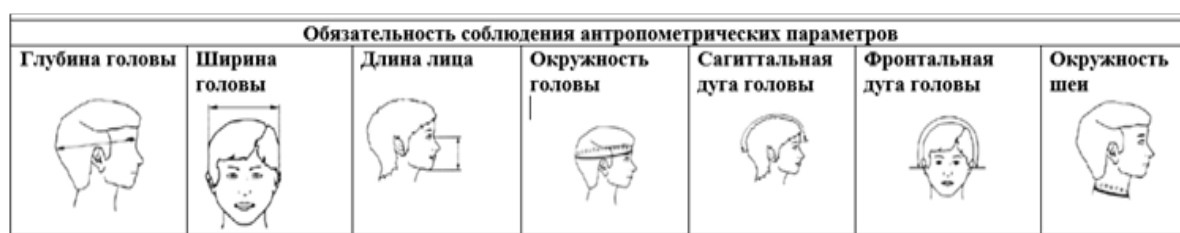


Рисунок 5 – Измерения головы по ГОСТ Р ИСО 725-2013 [15]



Рисунок 6 – Измерения лица по ГОСТ 12.4.244–2013 [18]

Результаты. Анализ результатов статистических данных по видам и типам профессиональных заболеваний (отравлений) установленных у работников разных отраслей экономики нашей страны в период с 2014 по 2023 гг. (рис. 1-3) выявил, что продолжают оставаться высокими уровни заболеваемости [1-11], связанные с органами дыхания. Поэтому актуальной продолжает быть проблема снижения показателей заболеваемости у работников от вредных факторов воздушной среды.

Одной из мер защиты является применение средств индивидуальной защиты органов дыхания, к которым должны предъявляться особые требования. Для их выявления было проведено исследование по нахождению группы нормативно правовых актов Российской Федерации (далее – НПА), устанавливающих и регулирующих обязательные условия безопасности, предъявляемые к данным защитам (табл. 1).

Сопоставление и анализ групп требований для СИЗОД ФД в НПА [13-23] между перечнями показателей безопасности (табл. 1) выявил их различия не только по группам требований, но и были выявлены имеющиеся отличия по элементам. Особенно существенные отличия, содержащиеся в НПА, имеются в требованиях, предъявляемых к показателям учета индивидуальных особенностей пользователей СИЗ, перечень которых приведен в таблице 1 и таблице 2.

То есть выявленные существенные отличия в НПА показывают, что к средствам защиты предъявляются разные требования в группах и подгруппах антропометрических показателей. И только в документах ГОСТ 12.4.174-87 [13], ГОСТ Р ИСО 7250-2007 [15], ГОСТ 12.4.244-2013 [18], ГОСТ 12.4.298-2015 [20] представлены и описываются подробные эргономические требования и показатели, которые нацелены

на приспособляемость средств защиты для использования людьми с различными антропометрическими размерами (рис. 5 и 6, табл. 1 и 2).

Данные требования очень важны, так как напрямую влияют на удобство и плотность прилегания к лицу СИЗОД и, следовательно, на их эффективность как средств защиты для разных работников от вредных факторов воздуха рабочей зоны.

Несоблюдения этих требований могут влиять на снижение защитных свойств СИЗОД от окружающей загрязненной воздушной среды, являться причиной несовершенства применяемых современных СИЗОД и способствовать росту у работников профессиональных заболеваний дыхательных систем (рис. 1-3) [1-10].

Проведенные специалистами по охране труда на разных предприятиях Челябинской области опросы у работников по выяснению их мнения о защитных свойствах СИЗОД выявили негативные отклики на удобство и комфортность, а именно на трудности подгонки защитных средств по лицу и голове. При движениях работника, наклонах и поворотах головы могут появляться неплотности. Неплотное прилегание к лицу является причиной проникновения загрязненного воздуха в подмасочное пространство.

На рисунке 7 представлены фотографии респиратора, используемого работником литейного участка после 8 часовой смены. Фотографии подтверждают наличие зазоров в местах прилегания СИЗОД к лицу, выражающееся в загрязнении респиратора с внутренней стороны. Поэтому требуются дальнейшие исследования по вопросу влияния антропометрических показателей на защитные свойства СИЗОД. При таких исследованиях нужны и новые подходы к оценке эффективности СИЗОД.



Рисунок 7 – Загрязненная сторона респиратора после рабочего дня

Обсуждение. В принципе, принимая во внимание общие требования к воздуху рабочей зоны, СИЗОД должны обеспечивать концентрацию вредных веществ во вдыхаемом работниками воздухе ниже или равной ПДК. Тогда можно записать:

$$K_i \leq \text{ПДК}_i, \quad (1)$$

где K_i – концентрация i -го вредного вещества во вдыхаемом работником воздухе при использовании СИЗОД, мг/м³; ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -го вредного вещества, мг/м³.

Учитывая, что вредное вещество может поступить из загрязненного воздуха рабочей зоны во вдыхаемый человеком воздух как через фильтр СИЗОД, так и через неплотности в местах прилегания СИЗОД к лицу, то концентрацию K_i можно рассматривать как сумму концентраций вредного вещества, попадающего во вдыхаемый работником воздух через фильтр СИЗОД и неплотности прилегания СИЗОД к лицу работника:

$$K_i = K_{\text{фи}} + K_{\text{ни}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{фи}}$ – концентрация i -го вредного вещества, попадающего во вдыхаемый работником воздух через фильтр СИЗОД, мг/м³; $K_{\text{ни}}$ – концентрация i -го вредного вещества, попадающего во вдыхаемый работником воздух через неплотности в местах прилегания СИЗОД к лицу работника, мг/м³.

Подставляя равенство (2) в выражение (1), получим условие, при котором СИЗОД будет эффективно действовать (обеспечивать концентрацию вредных веществ во вдыхаемом работниками воздухе ниже или равной ПДК):

$$K_{\text{фи}} + K_{\text{ни}} \leq \text{ПДК}_i. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет оценить эффективность СИЗОД, зная концентрации $K_{\text{фи}}$ и $K_{\text{ни}}$. Если фильтрующая способность фильтра СИЗОД уже известна (известно значение концентрации $K_{\text{фи}}$), то, исходя из выражения (3), при эффективном действии СИЗОД концентрация $K_{\text{ни}}$ должна удовлетворять следующему условию:

$$K_{\text{ни}} \leq \text{ПДК}_i - K_{\text{фи}}. \quad (4)$$

Если достоверно известно, что фильтрующая способность фильтра СИЗОД практически полностью исключает проникновение вредного вещества ($K_{\text{фи}}=0$), то из выражения (3) получим условие,

которому должна удовлетворять концентрация $K_{\text{ни}}$ при эффективном действии СИЗОД:

$$\begin{cases} K_{\text{ни}} \leq \text{ПДК}_i \\ K_{\text{фи}} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, полученные выражения (3), (4) и (5) позволяют оценить эффективность СИЗОД. Так, выражение (3) позволяет проверить эффективность СИЗОД при известных концентрациях $K_{\text{фи}}$ и $K_{\text{ни}}$. Данные концентрации можно определить на основе экспериментальных исследований.

При проведении экспериментов по влиянию антропометрических показателей на плотность прилегания СИЗОД в местах контакта с лицом работника можно воспользоваться выражениями (4) или (5). То есть СИЗОД будет эффективно защищать работника от вредностей в воздухе рабочей зоны, если будут выполняться условия (4) или (5).

При совершенствовании СИЗОД с точки зрения антропометрических показателей концентрации $K_{\text{ни}}$ вредного вещества, попадающего во вдыхаемый работником воздух через неплотности, должна снизиться при улучшении прилегания СИЗОД к лицу работника.

Выводы. Таким образом, в выявленных и рассмотренных НПА Российской Федерации [13-23] затрагиваются вопросы подбора СИЗОД по защитным показателям. Анализируя и обобщая эти показатели, можно сформулировать основные требования для подбора СИЗОД.

Во-первых, при выборе для работников СИЗОД необходимо руководствоваться перечнем условий их применения во время эксплуатации. Они должны обеспечивать необходимый уровень защиты здоровья работника.

Во-вторых, СИЗОД не должны терять своих защитных свойств, быть устойчивыми к различным воздействиям и удовлетворять требованиям безопасности для человека и среды обитания.

В-третьих, СИЗОД не должны затруднять работнику осуществлять его трудовую деятельность.

Обнаруженные в рассмотренных НПА различия по обязательному соблюдению антропометрических показателей эргономической группы и жалобы работников предприятий на СИЗОД тре-

буют проведения экспериментальных исследований по установлению влияния данных показателей на несовершенство защитных свойств СИЗОД, а также на эффективность защиты работников от вредных факторов воздушной среды. Эффективность применения СИЗОД можно оценить предлагаемыми выражениями (3), (4) и (5). Исследования по влиянию антропометрических показателей на защитные свойства СИЗОД в настоящее время проводятся на кафедре безопасности жизнедеятельности в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году: Государственный доклад. Ссылка: [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=27779] (дата обращения: 10.02.2025).
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=25076] (дата обращения: 10.02.2025).
3. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=21796] (дата обращения: 10.02.2025).
4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=18266] (дата обращения: 10.02.2025).
5. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2019 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=14933] (дата обращения: 10.02.2025).
6. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=12053] (дата обращения: 10.02.2025).
7. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=10145] (дата обращения: 10.02.2025).
8. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2016 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=8345] (дата обращения: 10.02.2025).
9. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2015 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=6851] (дата обращения: 10.02.2025).
10. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2014 году: Государственный доклад. [https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=3692] (дата обращения: 10.02.2025).
11. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019).
12. Технический регламент Таможенного союза 019/2011. «О безопасности средств индивидуальной защиты».
13. ГОСТ 12.4.174–87. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Номенклатура показателей качества». – М.: Стандартинформ, 1988.
14. ГОСТ Р 12.4.193–99. Система стандартов безопасности труда. «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Фильтры противогазовые и комбинированные. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 1999.
15. ГОСТ Р ИСО 7250–2007. «Базовые измерения человеческого тела в технологическом проектировании». – М.: Стандартинформ, 2008.
16. ГОСТ 12.4.034–2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Классификация и маркировка». – М.: Стандартинформ, 2018.
17. ГОСТ 12.4.245–2013. Система стандартов безопасности труда. «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Фильтры противогазовые и комбинированные. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2013.
18. ГОСТ 12.4.244–2013. Система стандартов безопасности труда. «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Полумаски и четвертьмаски из изолирующих материалов. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2014.
19. ГОСТ 12.4.294–2015. Система стандартов безопасности труда. «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Полумаски фильтрующие для защиты от аэрозолей. Общие технические условия» – М.: Стандартинформ, 2016.
20. ГОСТ 12.4.298–2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Эксплуатационные требования». – М.: Стандартинформ, 2016.
21. ГОСТ 12.4.299–2015 ССБТ «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Рекомендации по выбору, применению, и техническому обслуживанию». – М.: Стандартинформ, 2016.
22. ГОСТ 12.4.300–2015. Система стандартов безопасности труда. «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Полумаски фильтрующие с клапанами вдоха и несъемными противогазовыми и (или) комбинированными фильтрами. Общие технические условия». – М.: Стандартинформ, 2015.
23. ГОСТ Р 59959–2021. Система стандартов безопасности труда. «Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Полумаски фильтрующие для защиты от аэрозолей с дополнительной защитой от паров и газов. Общие технические требования. Методы испытаний. Маркировка» – М.: Российский институт стандартизации, 2022.

Статья поступила в редакцию 11.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 66.011

EDN: JHQAUT

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ИХ ПРОЛИВЕ НА ПОЖАРЕ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3604-7853

AuthorID: 830167

ORCID: 000-0002-0297-2984

КУЗЬМИН Анатолий Алексеевич, кандидат педагогических наук, доцент,
доцент кафедры «Физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности»
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149, e-mail: kaa47@mail.ru)

SPIN: 5444-3350

AuthorID: 831944

ORCID: 0000-0002-2081-6934

ПЕРМЯКОВ Алексей Александрович, кандидат педагогических наук, доцент,
начальник кафедры «Физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности»
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149, e-mail: jouker2005@yandex.ru)

SPIN: 4828-4313

AuthorID: 973906

ORCID: 000-0001-8254-9424

РОМАНОВ Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности»
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149, e-mail: nik57nik@mail.ru)

SPIN: 4438-8112

AuthorID: 832607

ORCID: 0000-0003-2716-0349

СИМОНОВА Марина Александровна, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности Инженерно-строительного института
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29
литера Б, e-mail: masima82@inbox.ru)

Аннотация. Деревянные конструкции традиционно используются в качестве конструкционных материалов в строительстве, в том числе и выполняющих несущие функции. При пожаре температура прогрева конструкции играет важную роль в процессе деструкции древесины. Целью исследования является разработка математической модели процесса тепломассобмена в деревянных конструкциях при их проливе на пожаре. Основными задачами – исследование изменение температуры в разных точках образца при проливе во времени и обработка результатов исследования. Для реализации этой цели проведены натурные эксперименты, а также для моделирования использован модуль AC/DC пакета *COMSOL Multiphysics*. Авторы выделяют необходимость учитывать специфические характеристики древесины, включая гигроскопичность и анизотропию, при выборе строительных материалов. Экспериментальные данные показывают, как температура и уровень влаги в древесине зависят от времени нагрева, что может оказать значительное влияние на безопасность зданий. В работе представлены модели, с помощью которых возможно детализировать закономерности тепло- и массообмена. Эти результаты открывают новые возможности для дальнейшего изучения пожарной безопасности деревянных конструкций, выявляя важные моменты для предотвращения распространения огня и увеличения времени устойчивости конструкций.

Ключевые слова: безопасность зданий, процесс горения, пожарный пролив, деревянная конструкция, влажность древесины, термическое воздействие, теплообмен, массообмен, моделирование, гигроскопичность.

RESEARCH INTO THE PROCESS OF HEAT AND MASS TRANSFER IN WOODEN STRUCTURES WHEN THEY ARE EXPOSED TO FIRE

© Authors 2025

KUZMIN Anatoly Alekseevich, candidate of pedagogical sciences, docent,
associate professor of the Department of Physical and Technical Fundamentals of Fire Safety
St. Petersburg State University of Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: kaa47@mail.ru)
PERMYAKOV Alexey Alexandrovich, candidate of pedagogical sciences, docent,

head of the Department of Physical and Technical Fundamentals of Fire Safety
St. Petersburg State University of Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: jouker2005@yandex.ru)

ROMANOV Nikolai Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent,
associate professor of the Department of Physical and Technical Fundamentals of Fire Safety
St. Petersburg State University of Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: nik57nik@mail.ru)

SIMONOVA Marina Alexandrovna, candidate of technical sciences, docent,
associate professor Graduate School of Technosphere Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29, e-mail: masima82@inbox.ru)

Abstract. Wooden structures are traditionally used as structural materials in construction, including those performing load-bearing functions. In case of fire, the heating temperature of the structure plays an important role in the process of wood destruction. The purpose of the study is to develop a mathematical model of the heat and mass transfer process in wooden structures during their spillage in a fire. The main tasks are to study the temperature change at different points of the sample during spillage over time and to process the results of the study. To achieve this goal, field experiments were conducted, as well as the AC/DC module of the *COMSOL Multiphysics* package was used for modeling. The authors emphasize the need to take into account the specific characteristics of wood, including hygroscopicity and anisotropy, when choosing building materials. Experimental data show how the temperature and moisture level in wood depend on the heating time, which can have a significant impact on the safety of buildings. The paper presents models with which it is possible to detail the patterns of heat and mass transfer. These results open up new opportunities for further investigation of the fire safety of wooden structures, identifying important points for preventing the spread of fire and increasing the stability time of structures.

Keywords: building safety, combustion process, fire spill, wooden structure, wood moisture, thermal impact, heat exchange, mass transfer, modeling, hygroscopicity.

Для цитирования: Кузьмин А.А. Исследование процесса тепломассобмена в деревянных конструкциях при их проливе на пожаре / А.А. Кузьмин, А.А. Пермяков, Н.Н. Романов, М.А. Симонова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 260-266. – EDN: JHQAYT.

Введение. Изучая опыт отечественных и зарубежных специалистов, можно выявить тенденцию к расширению области применения изделий из древесины. До 70% конечного использования изделий из древесины связано со строительными материалами, такими как напольные покрытия, несущие конструкции, окна и дверные рамы [1-4]. Древесина, являясь возобновляемым и натуральным материалом, обладает такими преимуществами, как высокое соотношение прочности к весу, достаточная технологичность в обработке и монтаже, а так же экологичность и способность к биологическому разложению, что обуславливает ее широкое использование в различных сферах деятельности [5-7].

Однако горючесть древесины повышает пожароопасность сооружений, выполненных с использованием деревянных конструкций. А влияние гигроскопичности и анизотропии древесных волокон с учетом использования воды для профилактического пролива в ходе пожаротушения, должно учитываться как весьма важный фактор при выборе подобных материалов [8, 9]. Таким образом применение «пролива» для охлаждения конструктивных элементов, которые несут основную нагрузку здания, позволит сохранить на некоторое время несущую способность конструкции, которая подверглась термическому воздействию пожара.

Большинство исследований связанных с про-

ревом древесины связаны с процессом ее термической обработки, которое обычно включает в себя три этапа: этап повышения температуры, собственно процесс ее термического воздействия, который длится около 2-3 часов, и этап охлаждения [10-14]. Причем режим прогрева древесины на первом этапе термической обработки примерно соответствует тепловому режиму пожара на его начальной стадии.

Если процесс тепло- и массообмена в деревянной конструкции на начальном этапе пожара будет возможно спрогнозировать, то тогда можно решить многие вопросы распространения пожара на объекте.

Методология. Целью исследования является разработка математической модели процессов тепло- и массообмена для прогнозирования времени процесса распространения тепла и распределения влажности внутри деревянных конструкций при их проливе в условиях пожара.

В ходе натурального эксперимента образцы древесины нагревались до температуры 160°C, 190°C и 220°C в высокотемпературной сушильной печи ВРГ-9050АН. Температура измерялась при помощи платиновой термопары Pt100, которая закреплялась в центре образцов. Потери влаги измерялись путем взвешивания на аналитических весах DX-3000. Процесс тепломассообмена образца иллюстрирует рисунок 1.

В процессе проведения натурных экспериментов и обработки полученных результатов были

сделаны следующие предположения: образцы симметричны по длине, ширине и толщине; процент влажности постоянно снижается в процессе теплового воздействия; усадки и разрушения твердого материала не происходит; в процессе нагрева не происходит химической реакции и внутри древесины не выделяется тепло.

Образцы были изготовлены из сосны, их размеры составляли 400×100×40 мм. (рис. 2).

Для измерения содержания влаги определялась масса образцов до и после нагрева. Воздействие воды в ходе пожаротушения на деревянный образец эмулировалось помещением его в сосуд с водой на 30 минут.

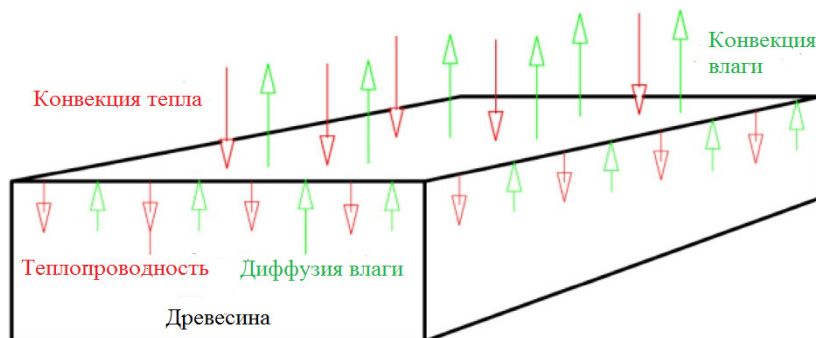


Рисунок 1 – Процесс тепломассообмена в исследуемом образце древесины

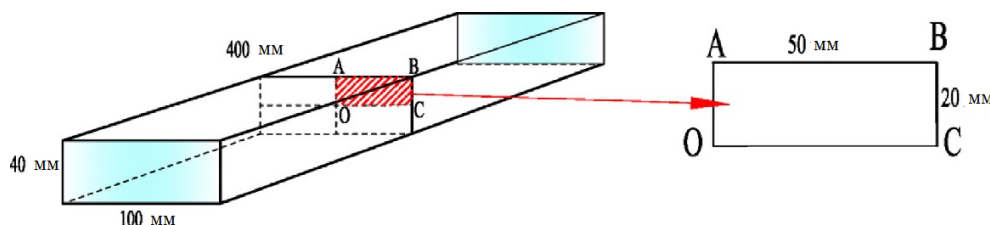


Рисунок 2 – Геометрические размеры испытываемых образцов

Тепло- и массообмен в продольном направлении не учитывался, поскольку в условиях реального пожара значение продольного направления было значительно больше, чем значения радиального и тангенциального направлений, а поверхность в продольном направлении может быть покрыта защитным слоем. Таким образом, тепло- и массообмен для образцов можно было упростить до двумерной модели поперечного сечения (АВСО). Граница АО и граница ОС являются симметричными границами, и на симметричных границах не происходит тепло- и массообмена, а на границах АВ и ВС происходит конвективный тепло- и массообмен.

Для понимания особенностей тепло- и массообмена деревянных конструкций в условиях пожара необходимы численные расчёты, включающие решение уравнений тепло- и влагообмена, а затем решение уравнений тепло- и массообмена внутри конструкций и на её границах [15].

При вышеупомянутых допущениях общие уравнения тепло- и массообмена, граничные условия и начальные условия для поперечного сечения образца (АВСО) выглядят следующим образом:

Общие уравнения тепломассообмена для двумерной задачи:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right). \quad (2)$$

Граничные условия для уравнения теплопередачи (1) и уравнения массообмена (2) выглядят как:

– для теплопередачи:

$$n \cdot (-\lambda \cdot \nabla t) = 0; \quad n(\lambda \cdot \nabla t) = h \cdot (t_m - t_w) + \gamma \cdot n \cdot (D \cdot \nabla c);$$

– для массопереноса влаги:

$$n \cdot (-D \cdot \nabla c) = 0; \quad n(D \cdot \nabla c) = k_c \cdot (c_d - c).$$

Здесь: коэффициент диффузии $D = k_m / (\rho \cdot M)$;

коэффициент теплопередачи $k_c = h_m / (\rho \cdot M)$.

В уравнениях (1) и (2), а также при определении граничных условий приняты следующие обозначения: t – текущая температура, °С; τ – время, мин; λ – коэффициент теплопроводности древесины, Вт/(м·К); ρ – плотность древесины, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); c – содержание влаги, моль/м³; D – коэффициент диффузии, м²/с; γ – молярная скрытая теплота водяного пара, Дж/моль; c_0 – начальная концентрация влаги в древесине, моль/м³; m_0 – начальная концентрация влаги в древесине, %; c_{dm} – концентрация влаги в нагревающей среде, моль/м³; h – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); t_m – температура греющей среды, °С; t_w – температура древесины, °С; t_0 – начальная температура древесины, °С; k_c – коэффициент массопередачи, м/с; M – удельная влагоемкость (кг_{вл}/кг_{др}), %; k_m – влагопроводность, кг/(м·с); h_m – коэффициент массопередачи в единицах массы, кг/(м²·с).

В процессе численного моделирования процесса тепломассообмена для коэффициента теплопроводности древесины λ используется его температурная зависимость, приведенная в [12]:

$$\lambda = 0,22751 - 0,193446 \cdot t + 6,1665 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 9,20927 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 7,3295 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 - 3,22302 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 + 7,411702 \cdot 10^{-12} \cdot t^6 - 6,993 \cdot 10^{-15} \cdot t^7.$$

Модель одновременной тепло- и массопередачи была сформирована с помощью модуля *AC/DC* пакета *COMSOL Multiphysics*, которая предоставляет широкий спектр техник и инструментов для проведения численных исследований [16-18].

Результаты. Чтобы продемонстрировать изменение температуры на начальной стадии термической обработки древесины, на рисунке 3, показано распределение температуры поперечного сечения (АВСО) в течение 60-минутного интервала теплового воздействия при 220°C.

Температура поверхности значительно выше внутренней температуры древесины, и не все участки образцов достигают заданной температуры в это время. Более того, температура на границе АВ и границе ВС значительно выше, чем на других участках, а точка пересечения В границы АВ и границы ВС достигла самой высокой температуры;

в то же время точка пересечения О границы АО и границы ОС достигла самой низкой температуры. Основная причина заключается в том, что тепло может передаваться древесине только с границы АВ и границы ВС, но не с границы АО и границы ОС. Тепловая конвекция может происходить непосредственно между границами АВ и ВС, но распространение теплопроводящего фронта до точки О требует определённого времени [19].

Временные зависимости температуры на поверхности образца древесины в точках А, В и С отображены на рисунках 4, 5 и 6 соответственно.

Из рисунков 4, 5 и 6 видно, что прогрев древесины поверхности древесины может выйти на стационарный режим за достаточно короткое время, что отражается в результатах анализа, обобщенных в таблице 1.

Таблица 1 – Время выхода на стационарный режим прогрева точек образца

Температура среды, °C	А	В	С
	Время выхода на стационарный режим, мин		
160	35	7	26
190	62	19	43
220	72	17	51

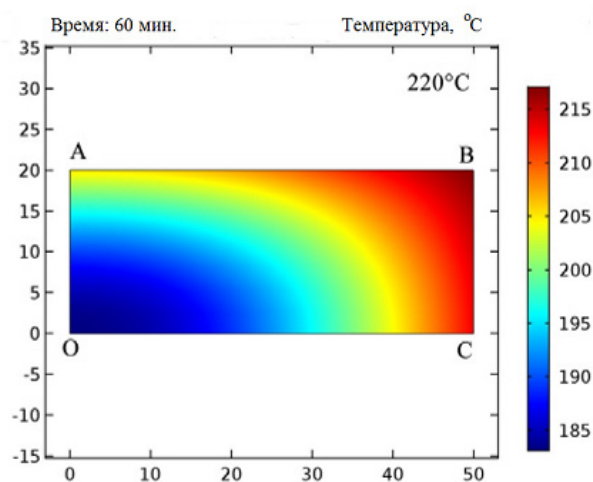


Рисунок 3 – Прогрев древесины при температуре 220°C

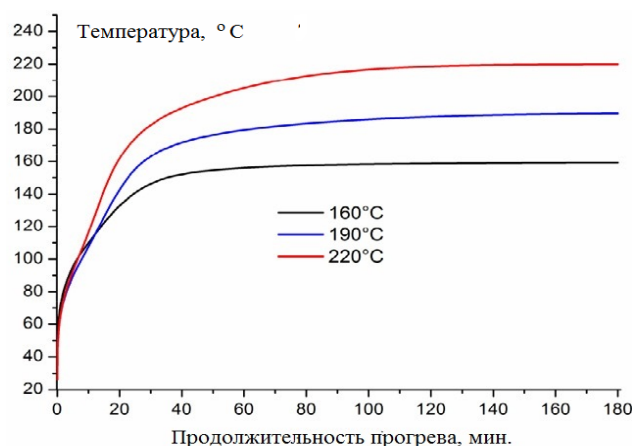


Рисунок 4 – Временная температурная зависимость на поверхности образца древесины в точке А

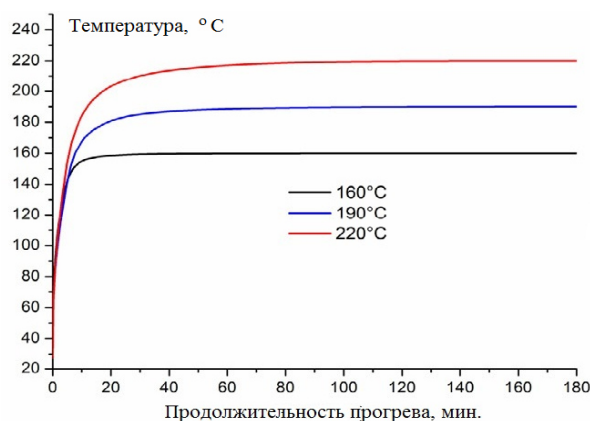


Рисунок 5 – Временная температурная зависимость на поверхности образца древесины в точке В

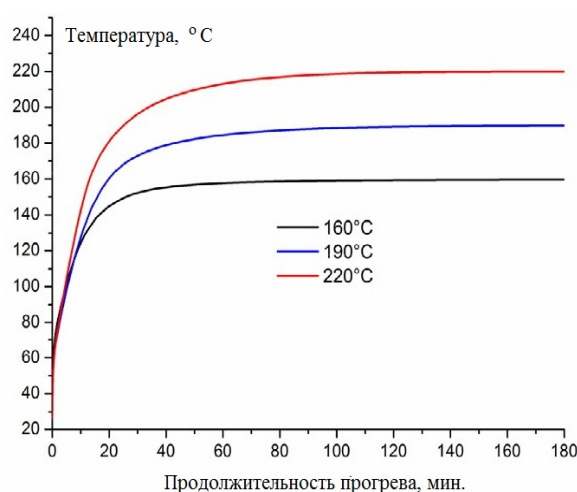


Рисунок 6 – Временная температурная зависимость на поверхности образца древесины в точке С

Обсуждение. Скорость прогрева образцов со временем снижалась в основном из-за того, что при уменьшении разницы температур между поверхностью древесины и греющей средой уменьшается и энергия, которая может передаваться конвекцией на поверхность древесины в соответствии с законом Ньютона-Рихмана.

Кроме того, данные на рисунке 3 показывают, что если температура на центральной точке древесины О достигает своего максимального значения, то все участки образцов переходят в стационарный режим. Таким образом, температура в точке О является наиболее важным параметром для определения момента перехода в стационарный режим прогрева образцов. Фактические и смоделированные значения температуры в центральной точке древесины О представлены на рисунке 7.

Из данных рисунка 7 следует, что температура в центральной точке О также повышается со временем, а скорость прогрева значительно ниже, чем на поверхности древесины. Кроме того, скорость прогрева образца уменьшается, часть тепла поглощается за счет теплопроводности, позволяя меньшему количеству энергии достигать центральной точки О.

Для оценки сформированной модели было

произведено сравнение фактических значений измерений температуры и значений, полученных в результате моделирования, использовалась стандартная ошибка SE (уравнение 3) и ошибка прогнозирования PE (уравнение 4):

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_p - t_a)^2}{N-1}}, \quad (3)$$

$$PE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{t_p - t_a}{t_p}}{N}. \quad (4)$$

Результаты сравнения результатов измерений температуры образца t_p и результатов моделирования t_a представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов измерений температуры и результатов моделирования

	Температура прогрева образца, °C		
	160	190	220
Стандартная ошибка, %	2,4	3,1	4,8
Ошибка моделирования, %	2,3	2,2	3,2

Значения полученных ошибок позволяют сделать вывод об адекватности используемой модели в контексте выбора модуля «AC/DC» пакета *COMSOL Multiphysics*.

В [19] представлено эмпирическое уравнение (5) для удельной влагоноскости M , которое позволило сформировать модель распределения влаги в массиве деревянной конструкции.

$$M = \frac{5,876 - 0,706 \cdot \ln(\tau) + -0,425 \cdot \ln^2(\tau) - 2,24 \cdot 10^{-2} \cdot t_m + 5,37 \cdot 10^{-5} \cdot t_m^2}{1 - 0,108 \cdot \ln(\tau) + 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot \ln^2(\tau) - 4,21 \cdot 10^{-3} \cdot t_m + 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot t_m^2} \quad (5)$$

Результаты моделирования процесса уменьшения влажности во внутренней части исследуемых образцов древесины по мере прогрева представлено на рисунках 8 и 9.

В [20] установлено, что содержание влаги в древесине тесно связано с температурой среды, на нее воздействующей: чем выше температура, тем ниже

содержание влаги во внутренней части древесины.

Как видно на рисунках 8 и 9 в точках А и В содержание влаги со временем уменьшается, в то время как в центральной точке оно остаётся постоянным. Содержание влаги в точке В является наименьшим для всех условий теплового воздействия пожара. Содержание влаги в точке А составляет 5,4%, 5,33% и 5,28%, а в точке В – 4,71%, 4,61% и 4,52% для образцов, прогреваемых при температуре 160 °С, 190 °С и 220 °С соответственно. Таким образом, профилактический эффект пролива пожарной нагрузки сохраняется довольно длительное время.

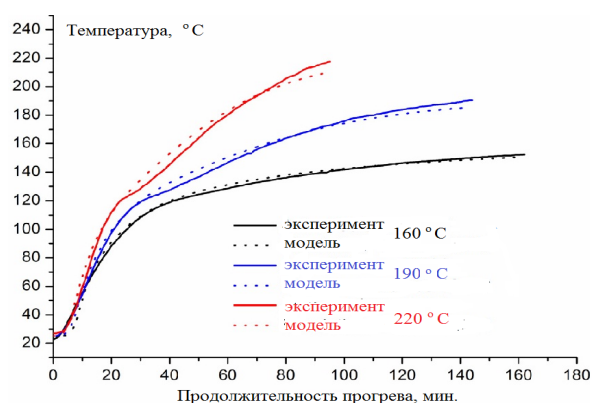


Рисунок 7 – Результаты измерения и моделирования прогрева образца древесины в точке О для различных температур прогрева

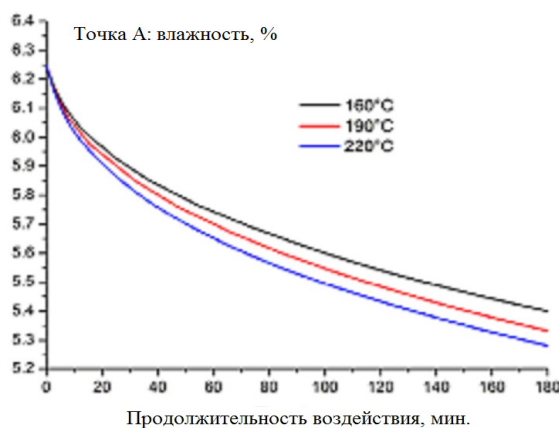


Рисунок 8 – Распределение влаги в точке А образца

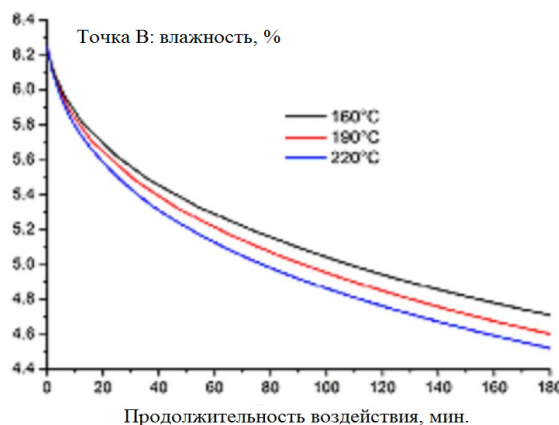


Рисунок 9 – Распределение влаги в точке В образца

Выводы. В настоящем исследовании на основе эксперимента была создана модель передачи тепла и влаги при тепловом воздействии пожара на деревянные конструкции после их пролива. Для решения задач по передаче тепла и влаги в соответствии с экспериментальными данными использовался модуль AC/DC пакета *COMSOL Multiphysics*. Были установлены зависимости между температурой и влажностью, температурой среды для термической обработки и временем обработки в центральной точке древесины или содержанием влаги, временем теплового воздействия и температурой продуктов горения на пожаре.

Экспериментально подтверждено, что представленные модель, метод и взаимосвязи могут быть использованы для моделирования тепломассобмена при тепловом воздействии пожара на деревянные конструкции после их пролива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Анфалов, А.М. Применение деревянных конструкций в строительстве / А.М. Анфалов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16-17 мая 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 31-35. – EDN JFDCSTH.
2. Погодина, Я.Д. Предпочтение потребителей к древесине как к материалу для строительства и отделки / Я.Д. Погодина, А.В. Сафина // Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 24-28 апреля 2023 года / Под редакцией Ю.М. Казакова [и др.]. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 397-400. – EDN RBPGRPO.
3. Herrera R, Arrese A, de Hoyos-Martinez PL, Labidi J, Llano-Ponte R. Evolution of thermally modified wood properties exposed to natural and artificial weathering and its potential as an element for façades systems. *Constr Build Mater* 2018;172:233–42.
4. Kržišnik D, Lesar B, Thaler N, Humar M. Micro and material climate monitoring in wooden buildings in sub-Alpine environments. *Constr Build Mater* 2018;188-95.
5. Лукьянов, А.М. О пожароопасности древесины при возведении мостов / А.М. Лукьянов, Д.А. Корольченко, А.Г. Агапов // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10, № 4(42). – С. 158-162. – EDN NRRWRQ.
6. Wood D, Vailati C, Menges A, Rüggeberg M. Hygroscopically actuated wood elements for weather responsive and self-forming building parts – facilitating upscaling and complex shape changes. *Constr Build Mater* 2018;165:782-91.
7. Niklewski J, Fredriksson M, Isaksson T. Moisture content prediction of rain-exposed wood: test and evaluation of a simple numerical model for durability applications. *Build Environ* 2016;97:126-36.
8. Лысенкин, В.В. Основные преимущества и недостатки применения клееных деревянных конструкций в качестве несущих конструкций / В.В. Лысенкин // Шаг в науку. – 2024. – № 1. – С. 60-65. – EDN SQZEEU.
9. Younsi R, Kocaefe D, Poncsak S, Kocaefe Y, Gastonguay L. A high temperature thermal treatment of wood using a multiscale computational model: application to wood poles. *Bioresour Technol* 2010;101:4630-8.
10. Кузнецов, Г.В. Воспламенение частиц влажной древесной биомассы в условиях конвективной диффузии водяных паров в пристенной области / Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, С.В. Сыродой // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 82-95. – DOI 10.15372/FGV20180309. – EDN XQOPHN.
11. Сорокина, М.А. К вопросу о методике тушения пожаров на складе сырья на лесопромышленных предприятиях / М.А. Сорокина // Форум молодых ученых. – 2019. – № 1-3(29). – С. 402-406. – EDN XSIMJY.
12. Исследование динамики плотности массивной древесины березы в процессе термической обработки / Р.Р. Сафин, К.В. Саерова, Е.Ю. Разумов, А.Ф. Илалова // Молодежь и XXI век – 2019: материалы IX Международной молодежной научной конференции, Курск, 21-22 февраля 2019 года. Том 5. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2019. – С. 161-165. – EDN YZUICT.
13. Li T, Cheng DI, Avramidis S, Wälinder MEP, Zhou DG. Response of hygroscopicity to heat treatment and its relation to durability of thermally modified wood. *Constr Build Mater* 2017;144:671-6.
14. He ZB, Yi SL. Wood drying theory. Beijing: China Forestry Press; 2016.
15. Kadem S, Lachemet A, Younsi R, Kocaefe D. 3d-Transient modeling of heat and mass transfer during heat treatment of wood. *Int Commun Heat Mass Transfer* 2011; 38:717–22.
16. Методы и средства информационно-операционной поддержки теплотехнических расчетов в решении задач пожарной безопасности / А.А. Кузьмин, Н.Н. Романов, Т.А. Кузьмина, А.А. Пермяков. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023. – 196 с. – ISBN 978-5-907724-23-5. – EDN FBYRNF.
17. Zhang J, Qu L, Wang Z, Zhao Z, He Z, Yi S. Simulation and validation of heat transfer during wood heat treatment process. *Results Phys* 2017;7:3806-12.
18. Lachaud J, Scoggins JB, Magin TE, Meyer MG, Mansour NN. A generic local thermal equilibrium model for porous reactive materials submitted to high temperatures. *Int J Heat Mass Transfer* 2017; 108:1406-17.
19. Shen H, Zhang S, Cao J, Jiang J, Wang W. Improving anti-weathering performance of thermally modified wood by TiO2 sol or/and paraffin emulsion. *Constr Build Mater* 2018;169:372-8.
20. Herrera R, Erdocia X, Labidi J, Llano-Ponte R. Chemical analysis of industrial-scale hydrothermal wood degraded by wood-rotting basidiomycetes and its action mechanisms. *Polym Degrad Stab* 2015;117:37-45.

Статья поступила в редакцию 15.04.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 331.45:004

EDN: IPGBWW

**УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
VR-ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9999-3796

AuthorID: 703733

ORCID: 0000-0001-7936-4517

ResearcherID: S-5079-2017

ScopusID: 57201959692

АНДРЕЕВ Андрей Викторович, кандидат военных наук, доцент,

Директор Высшей школы техносферной безопасности

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: andreev_av@spbstu.ru)*

SPIN: 1593-3198

AuthorID: 1072836

ORCID: 0000-0001-8321-3404

ШАВУРОВ Сергей Алексеевич, аспирант, ассистент Высшей школы техносферной безопасности*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: shavurov_sa@spbstu.ru)*

Аннотация. В статье сформулирован подход к формализации человеческого фактора (ЧФ) и его влияние на безопасность труда. Авторами выдвинута гипотеза, о том что компоненты составляющие ЧФ могут быть сгруппированы по признаку управляемости. Под управляемостью компоненты ЧФ предлагается понимать вероятность прогноза влияния компоненты ЧФ на профессиональный риск в ходе выполнения трудовых функций работником. Компоненты ЧФ влияние которых на профессиональный риск может быть спрогнозировано с достаточно высокой вероятностью предлагается отнести к управляемым, слабо прогнозируемые по влиянию на профессиональные риски компоненты относятся к неуправляемым, либо к слабо управляемым. Данная классификация позволяет свести управляемые компоненты ЧФ к единому показателю, определяющему профессиональную пригодность (ПП) работника. Поскольку управляемые компоненты могут быть оценены, скорректированы, может быть найден механизм влияния, позволяющий поддерживать профессиональные риски в заданных границах и влиять на безопасность труда. В качестве данного механизма предлагается использовать технологии виртуальной реальности (VR-технологии), широко используемые в различных сферах человеческой деятельности. Применение VR-технологий позволяет оценивать действия работников в аварийных и нештатных ситуациях, обучать работников правильным действиям в подобных ситуациях.

Ключевые слова: безопасность труда, человеческий фактор, профессиональная пригодность, виртуальная реальность.

HUMAN FACTOR MANAGEMENT USING VR TECHNOLOGIES IN THE LABOR SAFETY SYSTEM

© The Author(s) 2025

ANDREEV Andrey Viktorovich, candidate of military sciences,

director of the Higher School of Technosphere Security

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29, e-mail: andreev_av@spbstu.ru)***SHAVUROV Sergey Alekseevich**, postgraduate student, assistant of the Higher School of Technosphere Safety*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29, e-mail: shavurov_sa@spbstu.ru)*

Abstract. The article formulates an approach to formalizing the human factor (HF) and its impact on occupational safety. The authors put forward a hypothesis that the components of the HF can be grouped according to their controllability. It is proposed to understand the controllability of a HF component as the probability of predicting the impact of a HF component on professional risk during the performance of labor functions by an employee. HF components whose impact on professional risk can be predicted with a sufficiently high probability are proposed to be classified as controllable, components that are poorly predictable in terms of their impact on professional risks are classified as uncontrollable or poorly controllable. This classification allows us to reduce the controllable components of the HF to a single indicator that determines the professional suitability (PS) of an employee. Since the controllable components can be assessed and adjusted, a mechanism of influence can be found that allows maintaining professional risks within specified boundaries and affecting labor safety. It is proposed to use virtual reality technologies (VR technologies) widely used in various spheres of human activity as this mechanism. The use of VR technologies allows us to evaluate the actions of workers in emergency and abnormal situations, and to train workers in the correct actions in such situations.

Keywords: occupational safety, human factor, professional suitability, professional risk management, virtual reality,

Для цитирования: Андреев А.В. Управление человеческим фактором с использованием VR-технологий в системе безопасности труда / А.В. Андреев, С.А. Шавуров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 267-271. – EDN: IPGBWW.

Введение. В условиях постоянного усложнения производственных процессов и возрастания требований к безопасности труда, человеческий фактор (ЧФ) остаётся одной из основных причин происшествий и аварий на производстве. Результаты анализа причин аварий и инцидентов позволяют сделать вывод, что в более чем 70 процентов случаев связаны с бездействием или неправильными действиями работников. Комплекс этих причин получил наименование «человеческий фактор», однако несмотря на широкое использование данного термина, в научном сообществе нет единого мнения по его определению [1-5].

Так же в проанализированных научных работах прослеживаются различные подходы к рассмотрению содержания человеческого фактора, ряд авторов акцентирует внимание на ошибках работников и как следствии недостаточной квалификации работников, либо несоблюдение ими регламентов и инструкций. Другие авторы акцентируют внимание на глубинных причинах, таких как утомление, стрессы, снижение мотивации, личные установки или нарушения восприятия. В некоторых работах человеческий фактор сводится к «человеческой ненадёжности» и как следствие предлагается для исследования использовать аппарат теории надёжности технических систем. Значительное количество работ посвящено исследованию человеческого фактора и его влияния на безопасность в таких сферах человеческой деятельности как авиация и судоходство. Именно в данных сферах проявление человеческого фактора может привести к катастрофическим последствиям, например, ошибка в восприятии сигнала аппаратуры (взаимодействие «человек–машина»), недопонимание между членами экипажа (взаимодействие «человек–человек») или несоответствие действий внешним условиям, в том числе природным (взаимодействие «человек–среда») могут привести к катастрофе или аварии.

В то же время есть российское нормативное определение, которое было использовано для его исследования «человеческий фактор – совокупность личностных характеристик и поведения работающего, вызывающая в процессе трудовой деятельности преднамеренные или непреднамеренные, но неверные действия различного характера, в итоге приводящие к опасным происшествиям и ситуациям, инцидентам, авариям, несчастным случаям, производственно-обусловленным и профессиональным заболеваниям» [6]. Из определения следует, что только некие действия работника, ведущие к негативным последствиям, могут классифицироваться как человеческий фактор, т.е. бездействие таковым не является. Второе

следствие, человеческий фактор обязательно связан с негативными последствиями. Третье следствие, человеческий фактор обусловлен действиями работника и рассматривается в контексте выполнения трудовых действий и трудовых функций, которые в свою очередь однозначно сформулированы в профессиональных стандартах.

В большинстве работ ЧФ рассматривается как комплексное понятие, с большим количеством компонентов, однако набор этих компонентов значительно отличается друг от друга в различных публикациях [7-10]. Еще больший разброс мнений в научном сообществе связан с совокупностью (набором) характеристик работника, является ли он исчерпывающим, может ли быть некоторым образом систематизирован, сгруппирован или формализован. Задача формализации ЧФ, путем построения его модели, оптимально математической, проведена в значительном количестве научных работ. Объединяющим выводом абсолютное большинства работ является признание факта сложности формализации ЧФ и однозначного описания его структуры [11].

Оценка влияния человеческого фактора на безопасность труда имеет актуальное практическое значение. Во многих отраслях промышленного производства, особенно на объектах повышенной опасности практикуется тестирование работников к готовности выполнять трудовые функции. Однако единых методик тестирования работников на данный момент нет [12].

Методология. Авторами поставлена задача сформулировать подход к формализации ЧФ как элемента человеко-машинной системы в контексте обеспечения безопасности труда. В качестве отправной позиции данной работы выбрано исследование технической системы, с которой взаимодействует работник и неверные действия которого могут привести к негативным последствиям. Итоговой позицией является определение возможности осуществить управляющее воздействие на компоненты, составляющие человеческий фактор, с целью достижения заданного уровня безопасности труда. Рассматривается возможность использования в качестве инструмента воздействия на человеческий фактор VR-технологий. По мнению авторов, использование технологий виртуальной реальности позволит выйти на новый этап исследования оценки влияния человеческого фактора на безопасность труда.

Таким образом, формализация и систематизация ЧФ является актуальной производственной задачей. Для этого необходимо разработать модель, в которой ЧФ будет рассматриваться как сумма управляемых и неуправляемых компонен-

тов, с акцентом на возможности воздействия на первую категорию. Особое внимание в рамках такой модели должно уделяться оценке профессиональной пригодности, как наиболее управляемому элементу, определяющему поведение работника в производственной среде.

В качестве основы подхода к формализации ЧФ является разделение набора компонентов, составляющих ЧФ на две группы, по признаку управляемости. Т.е. набор компонентов ЧФ, которые являются управляемыми и набор компонентов, который не управляем либо, слабо управляем. Под управлением понимается комплексное воздействие на конкретный компонент ЧФ, с целью достижения заданного результата, применительно к конкретной трудовой функции, в рамках обеспечения безопасности труда. Авторы в данной статье не ставят задачу рассмотрения управления ЧФ, а сужают рамки до исследования компонентов ЧФ, на которые возможно оказать воздействие.

Результаты. В большинстве работ, посвященных исследованию ЧФ, приводятся следующие компоненты ЧФ, которые по степени управляемости условно сведены в три группы: неуправляемые, слабоуправляемые, управляемые.

Под управляемыми компонентами ЧФ понимаются профессиональные риски, которые можно спрогнозировать до начала выполнения трудовых функций работником.

Под неуправляемыми компонентами ЧФ понимаются профессиональные риски, прогноз которых априорно невозможно. Слабо управляемые компоненты ЧФ занимают промежуточное положение между управляемыми и неуправляемыми. Показателем, по которому компонент ЧФ может быть отнесен к одной из приведенных групп, может быть вероятность правильного прогноза $P_{\text{прог}}$:

– $0,7 < P_{\text{прог}} < 1$ компонент ЧФ может быть отнесен к управляемым;

– $0,1 < P_{\text{прог}} < 0,7$ компонент ЧФ может быть отнесен к слабоуправляемым;

– $0,1 > P_{\text{прог}}$ компонент ЧФ может быть отнесен к неуправляемым.

К наиболее часто описываемым в научных работах компонентам ЧФ относятся [13-19]:

– квалификация (КВ) – совокупность знаний, умений, навыков, опыта, необходимых для выполнения профессиональных обязанностей;

– мотивация (М) – степень внутренней заинтересованности работника в безопасном и эффективном труде;

– ответственность (О) – личностная установка на соблюдение норм и правил;

– профессионально важные качества (ПВК) – способности и характеристики, влияющие на успешность деятельности в конкретных условиях (внимание, память, быстрота реакции и т.д.);

– личные качества (ЛК) – черты характера, темперамент;

– психофизиологические качества (ПФК) – индивидуальные особенности восприятия, работоспособности, адаптации;

– ценности, установки, потребности (ЦУП) – глубинные внутренние ориентиры человека.

Исходя из предложенного категорирования компонент ЧФ, перечисленные компоненты сведены в три группы, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сгруппированные компоненты ЧФ

№	Наименование компонент ЧФ	Степень управляемости
1	КВ, М, О, ПВК	управляемые
2	ПФК, ЛК	слабоуправляемые
3	ЦУП, ЛК	неуправляемые

Формализованная модель ЧФ может быть представлена в виде:

$$HF = HF_c + HF_{uc} \quad (1)$$

где HF (*Human Factor*) – Человеческий фактор (ЧФ);

HF_c – *Human Factor Controllable* – управляемые компоненты ЧФ фактора, входящие в группу 1;

HF_{uc} – *Human Factor Uncontrollable* – неуправляемые и слабоуправляемые компоненты ЧФ, входящие в группу 2, 3.

Предлагается компоненты, входящие в группу один свести к условному интегральному показателю, который может быть использован для оценки профессиональной пригодности работника. Под профессиональной пригодностью (ПП) понимается совокупность личных качеств, знаний, навыков, умений, опыта, работника, позволяющих ему выполнять трудовые функции [20]. ПП определяет способность работника не только выполнять трудовые функции в штатных условиях, но и эффективно реагировать на нестандартные, аварийные и стрессовые ситуации, что особенно важно в сферах с повышенным уровнем профессионального риска. С учетом определенных условий можно сделать утверждение, что управляемая составляющая ЧФ, тождественна, профессиональной пригодности.

В свою очередь ПП может включать следующие компоненты:

– знания – теоретическая база и понимание процессов, регламентов, инструкций;

– умения и навыки – практическая способность к выполнению профессиональных действий;

– профессиональные качества – индивидуальные психофизиологические характеристики, обеспечивающие успешность выполнения задач;

– психологическая готовность – способность к концентрации, устойчивость к стрессу, уверенность в действиях;

– осознанная мотивация к безопасному поведению – понимание ценности жизни, здоровья и ответственности за результаты труда.

Приведенные компоненты ПП могут, оцениваться и корректироваться, а значит управляться.

С учетом тождества управляемой компоненты ЧФ профессиональной пригодности, можно предположить возможность оценки и корректировки влияния ЧФ на безопасность труда посредством влияния на компоненты составляющие ПП.

Представляет интерес инструмент, посредством которого может решаться, сформулированное выше предположение. В качестве интерактивного решения авторами предлагается использовать VR-технологии, которые являются перспективным и быстро развивающимся направлением в IT-технологиях [21].

VR – технологиями называют интерактивный мир, созданный с использованием современных компьютерных программ, который воспринимается человеком через технические устройства, подключенные к основным органам чувств. Моделирование физической реальности с использованием VR отличается убедительностью, интерактивностью, высокой детализацией виртуального пространства, эффектом присутствия. Особенно важным является последнее условие, поскольку предполагается,

что пользователь выступает не как наблюдатель, а как непосредственный участник событий, взаимодействуя с моделируемой ситуацией при помощи органов реальных действий. Использование виртуальной реальности позволяет:

- моделировать производственные ситуации, включая стрессовые, аварийные и нестандартные;
- оценивать реакцию работника на нештатные ситуации в условиях, приближенных к реальным;
- прививать навыки безопасного выполнения трудовых действий;
- осуществлять мониторинг навыков в пределах трудовых функций.

Применение VR-технологий обеспечивает возможность параллельной диагностики нейрофизиологических показателей – частоты сердечных сокращений, реакции зрачков и др., что дополнительно идентифицирует зоны профессионального риска и персональные ограничения работника [22].

Возможности оценивания и корректировки компонентов, составляющих ПП, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Соотношение возможности VR-технологий и компонентов ПП

Компонент ПП	Воздействие VR-технологий
Знания	Позволяет проводить интерактивное обучение в условиях, близких к реальным, отрабатывать процедуры, обучать действиям в нештатных ситуациях без риска для человека и оборудования.
Умения и навыки	Увлекательность и новизна технологии повышают вовлечённость; формирование причинно-следственной связи между действиями и последствиями усиливает внутреннюю мотивацию к безопасному поведению.
Психологическая готовность	В сценариях можно моделировать последствия ошибок или нарушений — таким образом формируется осознанная личная ответственность за соблюдение требований безопасности и профессиональных стандартов.
Профессионально качества	Через специализированные тренажёры можно развивать внимание, реакцию, устойчивость к стрессу, координацию и другие ПВК в контролируемых условиях.
Осознанная мотивация к безопасному поведению	Помогает погрузиться в стрессовые и нестандартные ситуации, что позволяет тренировать поведенческие паттерны без риска, формируя уверенность и устойчивость к давлению.

Использование виртуальной реальности позволяет так же решать следующие задачи:

- адаптировать новых работников, а именно быстро освоить особенности производственной среды без физического присутствия;
- поддерживать непрерывный цикл обучения, периодическое прохождение VR-тренингов помогает поддерживать готовность на должном уровне;
- диагностировать и выявлять склонности к ошибкам – анализ поведения в виртуальной среде позволяет выявить потенциальные зоны риска у конкретного работника.

Одним из преимуществ VR является возможность персонализации сценариев в зависимости от уровня подготовки, предыдущих результатов и особенностей человека. Таким образом создаётся возможность точечной работы с отдельными элементами человеческого фактора в целом и его управляемой составляющей в частности, что значительно повышает эффективность профилактики профессиональных ошибок [23].

Обсуждение. Результаты, представленные в данной работе, позволяют утверждать, что фор-

мализация ЧФ в контексте обеспечения безопасности труда является как теоретически обоснованной, так и практически значимой задачей. Предложенное разделение компонентов ЧФ по степени управляемости и введение интегрального показателя профессиональной пригодности (ПП) как управляемой части ЧФ открывают новые подходы к оценке и коррекции поведения работников.

Одним из ключевых моментов обсуждения является трактовка самого понятия ЧФ, как показано в работе существует значительное расхождение в определениях и подходах к интерпретации этого термина в научной и нормативной литературе. Выбор авторов конкретизирует трактовку ЧФ до совокупности действий работника, непосредственно влияющих на безопасность, согласуется с практико-ориентированным подходом и делает возможным применение системных методов анализа.

Предложенная модель, основанная на разделении компонентов ЧФ по признаку управляемости, позволяет не только классифицировать профессиональные риски, но и определить приоритетные направления для управленческого воз-

действия. В частности, признание тождества между управляемыми компонентами ЧФ и профессиональной пригодностью способствует созданию действенных инструментов диагностики и подготовки персонала.

Особый интерес вызывает использование VR-технологий как средства влияния на управляемые компоненты ЧФ. Представленные аргументы в пользу виртуальной реальности как инструмента формирования знаний, навыков и психологической устойчивости находят подтверждение в ряде зарубежных и российских исследований. Однако необходимо отметить, что внедрение таких технологий требует не только технической, но и методической подготовки, а также дальнейшего изучения вопроса этической приемлемости и валидности оценки результатов, полученных в виртуальной среде.

Выводы. Результаты исследования позволяют получить следующие выводы:

1. Формализация человеческого фактора как элемента системы безопасности труда позволяет точнее оценивать профессиональные риски и выработать целевые меры управления.
2. Введение интегрального показателя профессиональной пригодности способствует объективной оценке готовности специалиста к безопасному выполнению производственных задач.
3. Использование VR-технологий в обучении и оценке персонала повышает эффективность подготовки и снижает влияние субъективных факторов при контроле знаний и навыков и как следствие снижает вероятность реализации ЧФ.
4. Необходимо дальнейшее исследование эффективности применения технологий VR в области оценки профессиональной пригодности работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Власова Е.С. Исследование роли человеческого фактора на железнодорожном транспорте // ББК 39.2 Р764. – 2023. – С. 56.
2. Фадюшин С.Г. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением судна с учетом человеческого фактора // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2023. – Т. 15. – № 2. – С. 180-190.
3. Saghaian M. et al. Application of human factors in the development process of immersive visual technologies: challenges and future improvements // Frontiers in psychology. – 2021. – Т. 12. – С. 634352.
4. Андреев, А.В. Подход к определению техносферной безопасности / А.В. Андреев, А.С. Доронин, В.Д. Каченкова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 3(63). – С. 86-94. – EDN: FYBYVV.
5. Михайленко Е.Д., Фомин А.И. Управление персоналом угледобывающего предприятия по критерию влияния на человеческий фактор // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 1. – С. 44-50.
6. «ГОСТ 12.0.002-2014. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения».
7. Ворошилов Я.С. и др. Количественная модель человеческого фактора // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – № 6. – С. 3.
8. Ковальковская Н.О. и др. Шкалирование параметров влияния человеческого фактора на уровень профессионального риска на объектах машиностроения // Омский научный вестник. – 2020. – № 6 (174). – С. 15-21.
9. Ермаков С.В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судоходстве // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 5 (39). – С. 39-50.
10. Кирьянов Д.А., Сухарева Т.Н. Методы оценки человеческого капитала: анализ объективности и достаточности исходных данных // Теория и практика общественного развития. – 2011. – № 3. – С. 337-340.
11. Щербатов И.А. Математические модели сложных слабоформализуемых систем: компонентный подход // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2. – С. 70-78.
12. Каченкова, В.Д. Сравнение терминов в области безопасности России и Китая / В.Д. Каченкова, А.В. Андреев // Безопасность в профессиональной деятельности: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 31 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. – С. 147-154. – EDN: AGI-KBU
13. Кулешов В.В. и др. Количественная оценка влияния человеческого фактора на уровень профессионального риска // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2021. – № 2. – С. 47-54.
14. Новожилова А.А., Гергей А.М., Меркулова А.Г. Особенности исследования профессионального утомления в физиологии труда // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 238-246.
15. Кулешов В.В., Бакико Е.В. Оценка параметров влияния человеческого фактора на уровень профессионального риска с использованием шкалы Лайкерта // Техносферная безопасность. – 2021. – С. 34-35.
16. Зибров П.Ф., Зиброва О.Г. Математическая модель оценки связи между нереализованными возможностями статистических параметров многомерных систем // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 41-47.
17. Щербатов И.А., Проталинский И.О. Математическое моделирование сложных многокомпонентных систем // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 20. – № 1. – С. 17-26.
18. Маркелова С.В. Методология оценки влияния человеческого фактора // E-Scio. – 2022. – № 9 (72). – С. 259-267.
19. Огородников П.И., Перунов В.Б. Теоретические аспекты методики количественной оценки влияния человеческого фактора на финансовую устойчивость, на примере сельскохозяйственного предприятия // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – 2011. – № 3. – С. 67-67.
20. Ionescu B. I., Stefan J. Human-machine interaction in Industry 4.0 and beyond // Industrija. – 2021. – Т. 4. – С. 178-187.
21. Гумбатов В.Г., Иващенко Г.И. Современный подход к проблеме несчастных случаев на работе // Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 70-6. – С. 98-101.
22. Широков Ю.А. и др. Применение методов виртуальной реальности при обучении безопасности труда трактористов-машинистов // Наука, общество, образование в эпоху цифровизации и глобальных изменений. – 2022. – С. 176-192.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК 628.31

EDN: BVSMXR

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СОРБЕНТ ИЗ ОТХОДОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД**

© Автор(ы) 2025

SPIN-код 6169-8590

AuthorID 448228

ORCID: 0000-0002-1313-6826

Scopus ID: 55895350100

Researcher ID: P-7345-2015

ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 e-mail: krtar2018@bk.ru

БАГРЯНЦЕВ Александр Александрович, аспирант

Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 e-mail: mybox143@yandex.ru)

SPIN: 9964-2034

AuthorID: 439213

ORCID: 0000-0002-5914-6210

ScopusID: 57220085642

ПОЛИТАЕВА Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор,
профессор высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, politaevana1971@gmail.com)

Аннотация. Загрязнение гидросферы тяжелыми металлами в результате деятельности промышленных предприятий создает потенциальную экологическую угрозу для человека и окружающей среды. Для обеспечения экологической безопасности человека необходимо обеспечить качественную очистку сточных вод от ионов тяжелых металлов с использованием различных методов, в том числе сорбционных. В работе рассматривается разработка и оценка эффективности сорбционного материала, полученного на основе отходов целлюлозно-бумажной промышленности (СКОПа) для удаления ионов тяжелых металлов и нефтепродуктов из сточных вод. Проведено теоретическое обоснование выбора СКОПа как доступного, дешёвого и экологически безопасного сорбента, обладающего высокой удельной поверхностью и способностью к физико-химическому взаимодействию с загрязняющими веществами. Предложен способ обработки СКОПа с целью получения из него сорбента для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. В рамках экспериментальной части исследована кинетика сорбции ионов меди, цинка и железа на полученном сорбенте в статическом режиме и с перемешиванием. Установлено, что наиболее высокая степень очистки достигается при перемешивании, так для цинка эффективность очистки в этих условиях достигает 95%. Получены зависимости остаточной концентрации вышеуказанных ионов в модельных растворах и удельной сорбционной ёмкости сорбента от времени выдержки. Даны практические рекомендации по применению сорбента в системах очистки сточных вод. Полученные результаты подтверждают перспективность использования СКОПа как доступного, дешевого и эффективного сорбционного материала для промышленной очистки сточных вод от тяжелых металлов.

Ключевые слова: СКОП, сорбция, тяжёлые металлы, ионы меди, ионы цинка, водоочистка, нефтепродукты, термическая обработка, сорбционная ёмкость, отходы целлюлозно-бумажной промышленности.

**MODIFIED SORBENT FROM WASTE PULP AND PAPER PRODUCTION
FOR RECAPING HEAVY METALS FROM WASTEWATER**

© 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, Baidukov Ave. / Gagarina St., 1a/11 e-mail: krtar3028@bk.ru)

BAGRYANTSEV Alexander Alexandrovich, post-graduate student

Penza State Technological University
(440039, Penza, Baidukov Ave. / Gagarina St., 1a/11 e-mail: mybox143@yandex.ru)

POLITAYEVA Natalya Anatolyevna, doctor of technical sciences, professor,
professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnikeskaya, 29, politaevana1971@gmail.com)

Abstract. Pollution of the hydrosphere with heavy metals as a result of industrial enterprises' activities creates a potential ecological threat to humans and the environment. To ensure human ecological safety it is necessary to provide quality treatment of wastewater from heavy metal ions using various methods, including sorption methods. The paper deals with the development and evaluation of the efficiency of sorption material based on a by-product of the pulp and paper industry (SCOP) for the removal of heavy metal ions and petroleum products from wastewater. Theoretical substantiation of the choice of SCOPA as an accessible, cheap and environmentally safe sorbent with high specific surface area and ability to physicochemical interaction with pollutants is carried out. The method of SCOPA processing is proposed in order to obtain from it a sorbent for wastewater treatment from heavy metal ions. Within the experimental part the kinetics of sorption of copper, zinc and iron ions on the obtained sorbent in static mode and with stirring was investigated. It is established that the highest degree of purification is achieved at stirring, so for zinc the efficiency of purification in these conditions reaches 95%. Dependences of residual concentration of the above ions in model solutions and specific sorption capacity of the sorbent on holding time were obtained. The work also includes a review of existing methods of modification and utilization of SCOP, and also gives practical recommendations for its application in wastewater treatment systems. The obtained results confirm the prospectivity of using SCOP as an available, cheap and effective sorption material for industrial wastewater treatment from heavy metals.

Keywords: SCOP, sorption, heavy metals, copper ions, zinc ions, water treatment, oil products, thermal treatment, sorption capacity, pulp and paper industry waste.

Для цитирования: Таранцева К.Р. Модифицированный сорбент из отходов целлюлозно-бумажного производства для улавливания тяжелых металлов из сточных вод / К.Р. Таранцева, А.А. Багрянцев, Н.А. Политаева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 272-278. – EDN: BVSMXR.

Введение. Загрязнение гидросферы тяжелыми металлами в результате деятельности промышленных предприятий создает потенциальную экологическую угрозу для человека и окружающей среды. Для обеспечения экологической безопасности человека необходимо обеспечить качественную очистку сточных вод от ионов тяжелых металлов с использованием различных методов, в том числе сорбционных. Современные исследования подтверждают высокую сорбционную активность СКОПА, осадка, образующегося в процессе производства бумаги и картона, особенно после термической и физико-химической модификации. В настоящее время он не утилизируется и подлежит захоронению на полигонах. В то же время в его составе присутствует бумажное волокно, обладающее сорбционными свойствами [1]. Применение скопа в качестве сорбента для очистки сточных вод от тяжелых металлов позволит не только снизить нагрузку на гидросферу, но и улучшить обращение с отходами на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

В работах Шибек Л.А. и Синькевича В.О. показано, что предварительная термообработка скопа при 140-175°C позволяет значительно повысить его сорбционную способность по отношению к ионам меди. Образцы, обработанные при 140°C, демонстрируют выраженную физическую сорбцию за счёт пористой структуры, тогда как при 175°C усиливаются процессы химического взаимодействия [2].

Пиролиз и добавление минеральных компонентов в состав СКОПА, позволяет получить сорбенты с выраженной активностью к ионам тяжёлых металлов и нефтепродуктам [3]. Ультразвуковая обработка, как показали исследования Мифтаховой М.Н. и Махнюка Д.В., не оказывает положитель-

ного влияния на сорбционные характеристики, особенно в отношении ионов Fe^{+3} [4]. В то же время, термически модифицированные и гранулированные материалы на основе скопа имеют высокую сорбционную ёмкость к бензолу.

К технологиям получения сорбента из скопа относятся аэрофонтанная сушка, двухступенчатая термообработка, электроосмос и др., обеспечивающие устойчивую плавучесть и гидрофобность [5-7]. Обработанный с помощью этих технологий скоп позволяет получить экологически безопасные и дешёвые сорбенты для очистки сточных вод от тяжёлых металлов и нефтепродуктов. Его применение не только снижает нагрузку на окружающую среду не только за счёт улучшения качества стоков, но и, а за счёт использования производственных отходов [8].

Важной задачей при внедрении сорбционных материалов, полученных на основе скопа, в практику водоочистки является разработка экологически безопасных методов утилизации отработанных сорбентов [9].

При использовании сорбентов на основе СКОПА, для очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов или органическими загрязнителями (включая нефтепродукты), повторное их использование нецелесообразно из-за низкой регенерационной способности [10]. В связи с этим актуальны следующие направления их утилизации: термическое обезвреживание и использование в качестве компонента компостных, строительных смесей и др. [10-13].

Термическое обезвреживание (сжигание) позволяет не только эффективно уничтожить загрязняющие вещества, но и получить зольный остаток, пригодный для последующего применения в качестве минеральной добавки в удобрения или строительные материалы [13]. При этом необхо-

димо обеспечить соответствие параметров сжигания экологическим требованиям, особенно с учётом возможного присутствия хлорорганических соединений [14].

Вторым перспективным направлением является вовлечение загрязнённого сорбента в процессы аэробного компостирования совместно с биоразлагаемыми органическими отходами. В данном случае металлы, содержащиеся в сорбенте, могут выступать в роли микроэлементов, необходимых для роста растений. Однако данный подход требует предварительной оценки экологической безопасности конечного компоста [15].

Таким образом, выбор способа утилизации сорбента на основе СКОПа должен определяться характером накопленных загрязнителей, нормативными требованиями и возможностью вторичного использования продуктов переработки.

В данной работе в качестве сорбционного материала для удаления ионов тяжёлых металлов из водных растворов выбран осадок, образующийся в процессе очистки сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной промышленности [16]. Этот материал выбран по следующим причинам:

Во-первых, СКОП представляет собой доступное сырьё, образующееся в больших объёмах на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности и в настоящее время практически не утилизируемой, что улучшит обращение с отходами [17].

Во-вторых, СКОП обладает необходимой структурой и высоким содержанием органических компонентов с развитой сорбционной поверхностью и способностью к физико-химическому взаимодействию с ионами металлов [18]. Эти свойства особенно выражены после термической обработки, в результате которой удаляется влага, увеличивается удельная поверхность, а также активируются функциональные группы, способные вступать в ионный обмен и хелатные взаимодействия.

В ряде научных публикаций и диссертационных исследований показано, что СКОП, высушенный при температурах 140-175°C, демонстрирует высокую эффективность в удалении ионов Cu^{+2} , Zn^{+2} и Fe^{+3} , а его сорбционная ёмкость может достигать 200 мг/г [19]. Кроме того, данный материал обладает высокой устойчивостью к разрушению в водной среде и не вносит вторичного загрязнения, что является критически важным при работе с природными или сточными водами [20]. По сравнению с коммерческими сорбентами (активированный уголь, цеолиты, ионообменные смолы), СКОП отличается более низкой себестоимостью и возможностью масштабной локальной переработки на предприятиях-источниках образования отходов [21-22]. Таким образом, выбор СКОПа как основы для получения сорбционного материала полностью соответствует современным тенденциям экологически ориентированных технологий очистки водных ресурсов.

Методология. В данной работе представлены результаты исследования сорбционных свойств сорбента, полученного из осадка, образующегося в процессе очистки сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

Целью настоящего исследования является разработка метода получения сорбента из СКОПа и оценка его эффективности для удаления ионов тяжёлых металлов из сточных вод. В рамках поставленной цели проведена разработка метода получения сорбента и его последующее испытание в модельных водных растворах, содержащих ионы Cu^{+2} , Zn^{+2} , Fe^{+3} и органические загрязнители. В ходе экспериментов были получены кривые сорбции, отражающие зависимость остаточной концентрации загрязнителей и сорбционной ёмкости от времени контакта. Особое внимание уделено установлению механизмов сорбции конкретных ионов, включая анализ возможных процессов физической адсорбции, ионного обмена и комплексообразования. На основании экспериментальных данных сформулированы практические рекомендации по применению разработанного сорбента для очистки сточных вод различных отраслей промышленности, что позволяет рассматривать предложенную технологию как перспективную с точки зрения устойчивого развития и ресурсосбережения.

Объектами исследования являются ионы меди (Cu^{+2}), цинка (Zn^{+2}) и железа (Fe^{+3}), которые являются типичными загрязнителями природных и промышленных сточных вод. Удаление таких ионов с помощью сорбционных методов остаётся одним из наиболее перспективных. Особое внимание уделено анализу кинетики сорбции, оценке сорбционной ёмкости, а также влиянию гидродинамических условий и природы самих ионов на эффективность процесса.

СКОП для получения сорбента сушили при температуре 325°C в течение одного часа с целью удаления адсорбционной и структурной влаги. Потеря массы в процессе термической обработки составила более 80%, что подтверждает наличие значительного количества гигроскопической воды в исходной структуре. Масса сухого сорбента, использованного в каждом из экспериментов, составляла около 5 г.

Модельные водные растворы ионов тяжёлых металлов готовились с использованием государственных стандартных образцов (ГСО) соответствующих солей: меди (Cu^{+2}), цинка (Zn^{+2}) и железа (Fe^{+3}). Рабочие растворы готовились путём точного дозирования концентрированного ГСО (с исходной концентрацией 1000 мг/л) в мерную колбу объёмом 100 мл, с последующим доведением до метки дистиллированной водой. Для каждого из растворов объём добавленного ГСО рассчитывался индивидуально, исходя из необходимой концентрации металла в растворе (около 5 мг/л), что обеспечивало сопоставимость условий при срав-

нении сорбционных характеристик. Например, для получения раствора меди с концентрацией 5.148 мг/л в 100 мл среды использовали 0.5 мл исходного стандарта Cu^{+2} . Все растворы перед использованием тщательно перемешивались и выдерживались при комнатной температуре (25°C) для стабилизации. Контрольные аликваты отбирались до внесения сорбента и использовались для расчёта исходной концентрации металлов при определении эффективности сорбции. Отбор проб проводился каждые 30 минут.

Результаты. На рисунках 1 и 2 представлены графики зависимости остаточной концентрации меди в модельном растворе (C_e от t) и удельной сорбционной ёмкости сорбента (q_e от t) от времени

выдержки. Наблюдается устойчивое снижение концентрации ионов Cu^{+2} с исходной концентрации 5.148 до 2.600 мг/л и постепенный рост сорбционной ёмкости до 0.050 мг/г. Замедление динамики процесса после 150 минут указывает на приближение к сорбционному равновесию.

Для выявления роли перемешивания на процесс сорбции был проведён эксперимент с извлечением ионов цинка Zn^{+2} из модельных растворов. На рисунках 3 и 4 представлены графики зависимости остаточной концентрации ионов цинка в модельном растворе (C_e от t) и удельной сорбционной ёмкости сорбента (q_e от t) от времени выдержки. Выявлено, что без перемешивания эффективность составила 77.1%, сорбционная ёмкость – 0.0797 мг/г.

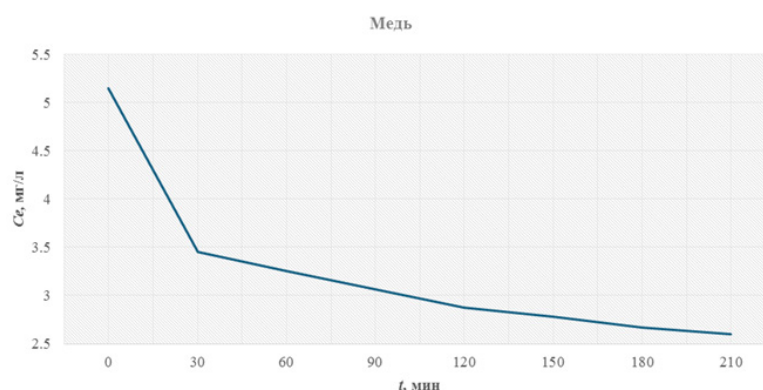


Рисунок 1 – Остаточная концентрация ионов меди (C_e) в растворах без перемешивания

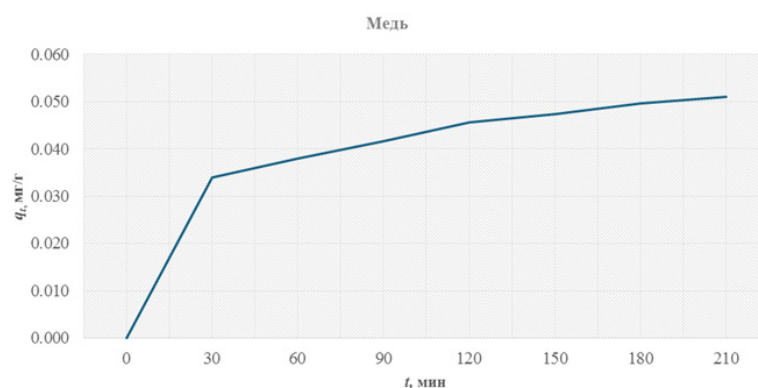


Рисунок 2 – Удельная сорбционная ёмкость (q_e) меди в растворах без перемешивания

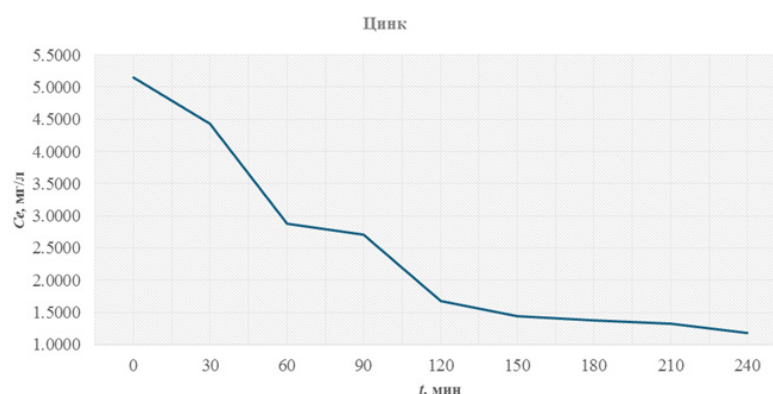
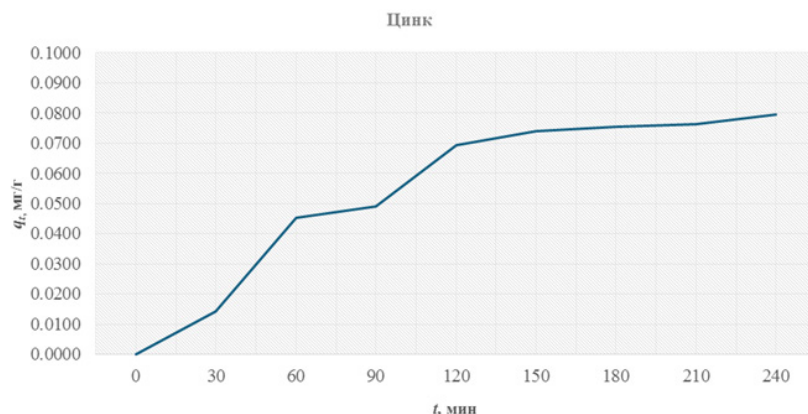


Рисунок 3 – Остаточная концентрация ионов цинка (C_e) в растворах без перемешивания

Рисунок 4 – Удельная сорбционная ёмкость (q_e) ионов цинка в растворах без перемешивания

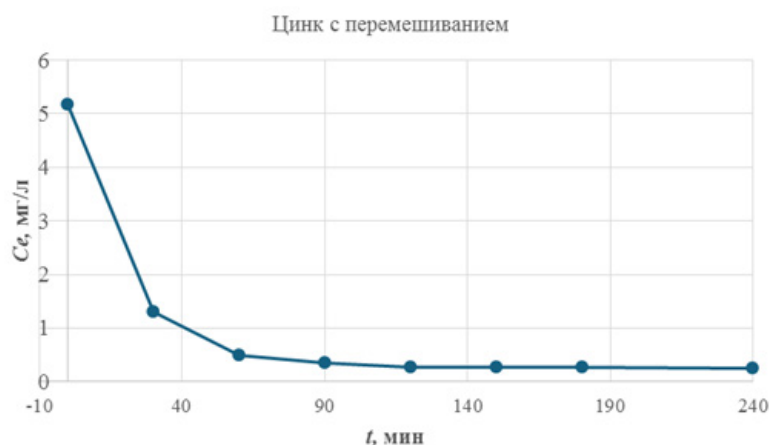
Сравнение этих результатов с результатами, полученными при перемешивании (рис. 5, 6), показало следующее. При начальной концентрации $Zn^{+2} = 5.1759$ мг/л, уже через 30 минут концентрации ионов снизилась до 1.3118 мг/л, что соответствовало эффективности 74.6%, а к 240 минутам она составила 0.2422 мг/л (эффективность 95.3%). При этом сорбционная ёмкость достигла 0.099 мг/г, что почти в 1,2 раза превышает значения, полученные в растворах без перемешивания. По-видимому, в отсутствие перемешивания вокруг частиц СКОПа формируется пограничный слой жидкости большой толщины, затрудняющий транспорт ионов к активной поверхности.

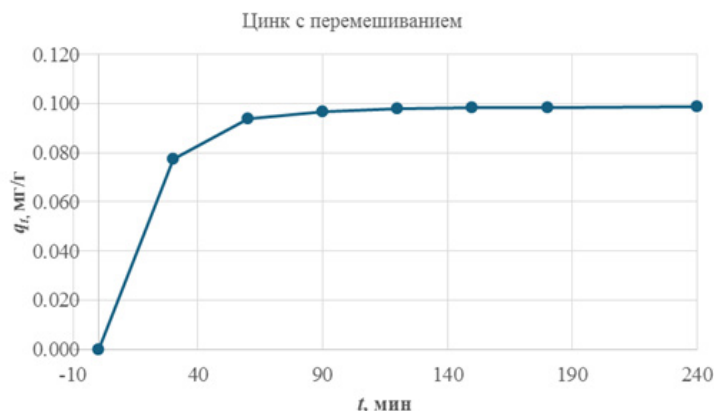
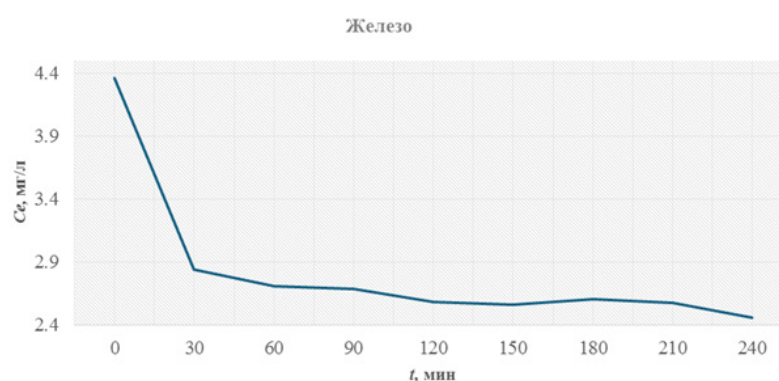
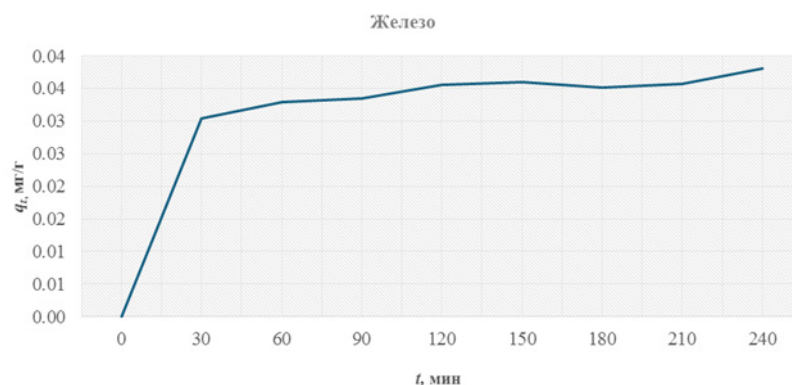
Низкая эффективность извлечения ионов меди из растворов, по сравнению с цинком, по всей видимости, связана с тем, что ионы Zn^{+2} , обладают меньшим гидратным радиусом и меньшей энергией гидратации по сравнению с Cu^{+2} . Во всех рассмотренных результатах наблюдалась двухстадийная кинетика: сначала быстрая фаза внешнедиффузионного переноса, затем – замедление процесса, связанное с насыщением сорбционных центров.

На последнем этапе исследовали сорбцию ионов железа (Fe^{+3}) с исходной концентрацией в модельном растворе 4.3587 мг/л. Выявлено, что за 240 минут

эффективность удаления Fe^{+3} достигла 42.6%, при сорбционной ёмкости 0.038 мг/г. Кинетика процесса оказалась нестабильной, особенно начиная с 180-й минуты, когда наблюдался неожиданный рост концентрации. Это может быть связано с начавшейся десорбцией, вызванной либо изменением pH среды, либо нарушением структуры поверхности сорбента. Известно, что ионы Fe^{+3} обладают самой высокой энергией гидратации среди исследуемых металлов (более -4600 кДж/моль), а их гидратный радиус значительно превышает аналогичные значения для Cu^{+2} и Zn^{+2} . Это делает диффузию таких ионов в микропоры материала крайне затруднительной, особенно без перемешивания.

На рисунках 7 и 8 представлены графики зависимости остаточной концентрации железа в модельном растворе (C_e) и удельной сорбционной ёмкости сорбента (q_e) от времени выдержки (t) при сорбции ионов Fe^{+3} без перемешивания. Максимальная эффективность наблюдается к 240 минутам – концентрация снижается до 2.4546 мг/л, а сорбционная ёмкость достигает 0.038 мг/г. Обнаружена нестабильность процесса: на 180-й минуте зафиксировано временное повышение концентрации, вероятно связанное с десорбцией или разрушением активных участков сорбента.

Рисунок 5 – Остаточная концентрация ионов цинка (C_e) от времени сорбции в перемешиваемых растворах.

Рисунок 6 – Удельная сорбционная ёмкость (q_e) ионов цинка в перемешиваемых растворахРисунок 7 – Зависимость остаточной концентрации ионов железа (C_e) от времени при сорбции в статических условияхРисунок 8 – Зависимость удельной сорбционной ёмкости (q_e) от времени при сорбции ионов железа без перемешивания

Обсуждение. Полученные в ходе исследования результаты подтверждают эффективность использования СКОПа, термообработанного при температуре 325°C в течение одного часа в качестве сорбционного материала для удаления ионов тяжёлых металлов из водных растворов. Экспериментально установлено, что максимальная эффективность сорбции достигалась при использовании термически обработанного СКОПа в динамических условиях, т.е. в перемешиваемых растворах, особенно в отношении ионов Zn^{+2} , где степень извлечения составила 95% при сорбционной ёмкости 0.099 мг/г. Полученные данные со-

поставимы с результатами, полученными авторами Шибeka Л.А. и Синькевича В.О. [2], где сорбенты на основе СКОПа, обработанные при температурах 140 и 175°C, также демонстрировали выраженную сорбционную активность в отношении меди и цинка, причём материал, обработанный при 140°C, обладал повышенной пористостью и более высокой скоростью физической сорбции.

В работе Мифтахова М.Н. и Махнюка Д.В. [3] сообщается о сорбции ионов меди, увеличившейся на 48,8% при термообработке СКОПа, что согласуется с тенденцией, выявленной в настоящем исследовании. Однако эффективность сорбции ионов

Fe^{+3} в их эксперименте была ограничена (~69%), что также подтверждается нашими результатами: максимальная эффективность удаления Fe^{+3} составила лишь 42.6%, что может быть связано с его высокой энергией гидратации и ограниченной диффузией в структуре сорбента. В ряде работ отмечается, что плотная структура материала после термообработки при высоких температурах (выше 175°C) приводит к снижению удельной поверхности и ухудшению кинетики сорбции. Наши результаты частично подтверждают это: несмотря на стабильность сорбента, скорость извлечения ионов Cu^{+2} оставалась умеренной, с максимальной сорбционной ёмкостью около 0.050 мг/г.

Таким образом, результаты настоящей работы подтверждают, что СКОП после термической подготовки может являться сырьем для создания дешёвых сорбентов, пригодных для удаления тяжёлых металлов. Выявленные различия в сорбционной активности по отношению к различным ионам подчёркивают необходимость продолжения работы над его модификацией.

Выводы. Термическая обработка СКОПа при температуре 325°C позволяет значительно повысить его сорбционные характеристики по отношению к ионам Cu^{+2} , Zn^{+2} и Fe^{+3} .

При перемешивании процесс сорбции протекает интенсивнее, а сорбционная ёмкость достигает более высоких значений, особенно в случае с ионами Zn^{+2} , для которых эффективность удаления превышает 95%. Для ионов меди и железа эффективность процесса ниже, что связано с их физико-химическими особенностями: крупным гидратным радиусом, высокой энергией гидратации и склонностью к комплексообразованию.

Полученные зависимости остаточной концентрации (C_e) и сорбционной ёмкости (q_e) от времени позволили проанализировать кинетику процесса и установить его двухстадийный характер: быстрая внешнелатентная сорбция и более медленная внутренняя диффузия.

Таким образом, термообработанный предложенным способом СКОП может служить альтернативой традиционным сорбентам, тем самым не только снизить загрязнение гидросферы тяжёлыми металлами, но и улучшить обращение с отходами на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ширинкина Е.С., Айтжанова У.М. Переработка скопа, образующегося в технологическом процессе картонно-бумажного производства // *European science*. – 2016. – № 2 (12). – С. 13-16.
2. Шибка Л.А., Синькевич В.О. Перспективы использования скопа в процессах очистки сточных вод от ионов меди // *Системы управления экологической безопасностью*. 2019. – С. 125-128.
3. Кузнецова Л.Н. Пиролиз осадков сточных вод ЦБП с получением органоминеральных адсорбентов для очистки промышленных стоков. Дисс. на соиск. ученой степени канд.техн. наук. Архангельск. – 2000. – 190 с.
4. Мифтахов М.Н., Махнюк Д.В. Исследование сорбционных свойств модифицированных сорбентов, полученных из отходов целлюлозно-бумажной промыш-

ленности-скопа // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. – 2020. – №. 3. – С. 21-28.

5. Холуденева А.О., Полянская Е.А., Танасов И.Д. Теоретическое обоснование применения электроосмоса для снижения влажности пористых структур отходов // *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*. – 2016. – 4 (25). – С. 148-150.

6. Залыгина О.С., Латош Е.С. Использование скопа в качестве выгорающей добавки при производстве керамического кирпича // *Химическая технология и техника*. – 2021. – С. 170-172.

7. Новожилов Е.В. и др. Характеристика скопа, образующегося при локальной очистке волоконсодержащих сточных вод // *Химия растительного сырья*. – 2014. – №. 4. – С. 279-286.

8. Шибка Л.А., Синькевич В.О. Эффективность применения скопа в процессах очистки сточных вод от красящих веществ. – 2019.

9. Артемьева А.А. Использование осадка механической очистки сточных вод картонно-бумажного производства // *Научный альманах*. – 2019. – №. 11-2. – С. 180-182.

10. Новожилов Е.В. и др. Характеристика скопа, образующегося при локальной очистке волоконсодержащих сточных вод // *Химия растительного сырья*. – 2014. – №. 4. – С. 279-286.

11. Имайкина А.Р., Ширинкина Е.С. Анализ направлений использования осадков сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий в строительной отрасли // *Химия. Экология. Урбанистика*. – 2018. – Т. 2018. – С. 108-111.

12. Залыгина О.С., Епишина А.Н. Получение сорбента из скопа для умягчения воды // *Система управления экологической безопасностью*. – Екатеринбург, 2025. – 2025. – С. 271-275.

13. Холуденева А.О., Ефремова С.Ю. Снижение негативного влияния осадка сточных вод картонно-бумажного производства на почву // *Плодородие*. – 2021. – №5. – С. 101-104.

14. Холуденева А.О., Ефремова С.Ю. Снижение негативного влияния осадка сточных вод на почву путем его электроосмотического обезвоживания // *Природообустройство*. – 2021. – (3). – С. 40-47.

15. Залевская Ю.М., Белик Е.С., Бурмистрова М.В. Проблема очистки сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности // *Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика*. – 2015. – Т. 1. – С. 137-144.

16. Вайсман Я.И. и др. Способ переработки лигнинсодержащих отходов целлюлозно-бумажной промышленности с получением сорбентов для очистки сточных вод // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2018. – №. 3. – С. 93-99.

17. Гребенкин А. Волокнисто-минеральные отходы целлюлозно-бумажного производства как сорбенты для разлитых нефтепродуктов // *Химические волокна*. – 2021. – №. 2. – С. 28.

18. Байков К.А., Садовцева О.С. Методы очистки сточных вод от загрязнений нефтью и нефтепродуктами // *Актуальные проблемы науки, производства и химического образования*. – 2020. – С. 8-11.

19. Сазонова А.В., Лямцев С.Е. Перспективы использования природных сорбентов для очистки сточных вод от техногенных загрязнений // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. – 2015. – №. 3 (16). – С. 80.

20. Харлямов Д., Мифтахов М.Н. Использование модифицированных отходов переработки макулатуры для очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2024. – №. 3 (141). – С. 99.

21. Назаров А.М. и др. Исследование эффективности природных и модифицированных сорбентов для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжёлых металлов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. – 2018. – Т. 10. – №. 5. – С. 125-143.

22. Барина О.В. Сорбенты для очистки сточных вод от нефтепродуктов (обзор) // *Актуальные проблемы военных научных исследований*. – 2020. – №. S8. – С. 163-175.

Статья поступила в редакцию 16.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025

УДК: 504.064

EDN: AWGPUN

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

© Авторы 2025

SPIN: 1425-6743

AuthorID: 1068622

ORCID: 0009-0009-3623-6326

ЗУПАРОВА Валерия Владимировна, ассистент кафедры «Программирование»*Пензенский государственный технологический университет**(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparovavv@penzgtu.ru)*

SPIN: 7081-4490

AuthorID: 618456

ORCID: 0000-0002-1233-1304

СЛУГИНОВА Наталья Ивановна, кандидат сельскохозяйственных наук,

доцент кафедры «Технология и техносферная безопасность»

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

SPIN: 9210-2864

AuthorID: 624794

ORCID: 0000-0002-2353-1547

СИМОНОВА Зоя Александровна, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Экология и техносферная безопасность»

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.**(410054, Россия, Саратов, ул. Политехническая, д. 77, e-mail: simonovaza@yandex.ru)*

Аннотация. В статье представлен прототип цифрового двойника, моделирующего пространственное распределение и временную динамику выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на территории Пензенской области. Исследование направлено на разработку и апробацию методики создания цифрового двойника для комплексного мониторинга и прогнозирования качества атмосферного воздуха на региональном уровне. Проведена агрегация и нормализация данных, реализована пространственная привязка и построены временные ряды для ключевых загрязнителей: диоксида серы, оксида углерода и оксида азота. В рамках исследования проведено прогнозирование выбросов с использованием алгоритмов машинного обучения: линейной регрессии, случайного леса и метода ближайших соседей. Разработанный цифровой двойник позволяет не только анализировать текущую экологическую ситуацию, но и строить обоснованные прогнозы, поддерживающие принятие решений в сфере охраны окружающей среды. Модульная структура прототипа обеспечивает возможность масштабирования и применения в других регионах, а также интеграции с дополнительными источниками данных, включая сенсоры и спутниковые наблюдения.

Ключевые слова: цифровой двойник, загрязнение воздуха, визуализация данных, экологический мониторинг, машинное обучение, *Streamlit*, *Power BI*.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION

© The Authors 2025

ZUPAROVA Valeria Vladimirovna, assistant of the Department «Programming»*Penza State Technological University**(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: zuparovavv@penzgtu.ru)***SLUGINOVA Natalia Ivanovna**, candidate of agricultural sciences,

associate professor of the Department of Technology and Technosphere Safety

*Penza State Technological University**(440039, Russia, Penza, Baidukova Drive/Gagarina Street, 1a/11, e-mail: princess_natalia@mail.ru)***SIMONOVA Zoya Alexandrovna**, candidate of biological sciences,

associate professor of the Department of Ecology and Technosphere Safety

*Saratov State Technical University named after Yuri A. Gagarin**(410054, Russia, Saratov, Polytechnic st., 77, e-mail: simonovaza@yandex.ru)*

Abstract. The article presents a prototype of a digital twin that models the spatial distribution and temporal dynamics of air pollutant emissions within Penza region. The study aims to develop and test a methodology for creating a digital twin intended for comprehensive monitoring and prediction of regional atmospheric air quality. Data aggregation and normalization were carried out, spatial referencing was implemented, and time series were constructed for key pollutants: sulfur dioxide, carbon monoxide, and nitrogen oxide. Within this research, emission forecasts were made using machine learning algorithms such as linear regression, random forest, and *k*-nearest neighbors method. The developed digital twin not only allows analyzing current environmental conditions but also provides reliable predictions supporting decision-

making in environmental protection. The modular structure of the prototype ensures scalability and applicability in other regions, as well as integration with additional data sources including sensors and satellite observations.

Keywords: digital twin, air pollution, data visualization, environmental monitoring, machine learning, *Streamlit*, *Power BI*.

Для цитирования: Зупарова В.В. Разработка цифрового двойника загрязнения атмосферного воздуха / В.В. Зупарова, Н.И. Слугинова, З.А. Симонова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 2(70). – С. 279-286. – EDN: AWGPUN.

Введение. В последние годы технологии цифровых двойников всё шире применяются в задачах мониторинга окружающей среды. Эти цифровые аналоги реальных объектов или процессов позволяют моделировать и прогнозировать сложные системы на основе разнообразных данных, включая геопространственную и временную информацию. Особенно востребованы такие решения в области оценки качества атмосферного воздуха, где традиционные методы мониторинга ограничены по оперативности и глубине анализа [1-4].

Проблема загрязнения атмосферы сохраняет актуальность для регионов России. Несмотря на наличие отчётности по форме 2-ТП (воздух), собранные данные редко используются в связке с инструментами визуализации и интеллектуального анализа [5, 6]. Это ограничивает возможности органов управления в принятии решений, особенно в условиях территориальной неоднородности загрязнений.

В мировой практике цифровые двойники уже успешно применяются для анализа выбросов, климатического моделирования и прогнозов состояния воздуха [7, 8]. Однако в российской научной и прикладной практике реализация подобных решений всё ещё единична. Тем важнее создание адаптированных моделей на доступных данных и открытых платформах.

Настоящее исследование направлено на разработку цифрового двойника, моделирующего выбросы загрязняющих веществ в атмосферу Пензенской области. В основе лежат официальные данные, пространственная информация о муниципалитетах и современные средства визуализации и предиктивной аналитики. В качестве инструментов применялись *Python* и библиотеки *Streamlit* и *Power BI*, обеспечивающие доступность решений как для исследователей, так и для органов управления.

В условиях цифровой трансформации экологического мониторинга данная работа направлена на демонстрацию возможностей интеграции статистических, геопространственных и алгоритмических компонентов в единое аналитическое решение. Исследование иллюстрирует, как на основе доступных данных можно построить систему, способную не только отображать текущее состояние атмосферного воздуха, но и формировать обоснованные прогнозы, подкреплённые визуальными и вычислительными модулями. Такой подход создаёт основу для более широкого внедрения

цифровых двойников в задачи устойчивого управления окружающей средой.

Методология. Методология исследования опирается на концепцию цифрового двойника как совокупности цифровых моделей, визуализаций и алгоритмов, воспроизводящих поведение реальной экологической системы региона в динамике. Такой подход особенно актуален для задач пространственно-временного анализа загрязнений атмосферы на региональном уровне.

В качестве основного источника данных использовалась официальная отчётность формы 2-ТП (воздух) за 2020-2024 годы [5, 6], содержащая сведения о выбросах ключевых загрязняющих веществ: диоксида серы, оксида углерода и оксида азота, сгруппированные по муниципалитетам. Для геопространственной привязки применялись координаты административных центров районов, собранные вручную из открытых источников и согласованные с названиями в отчётности.

На этапе подготовки данных были объединены и нормализованы таблицы за пять лет. Обработка выполнялась в среде *Python* с использованием библиотек *pandas*, *numpy*, *geopandas*. В качестве примера ниже приведён фрагмент кода агрегации данных по годам:

```
import pandas as pd
# Загрузка данных с разделителем ;
df = pd.read_csv("penza_streamlit_data_filled.csv",
sep=";")
# Группировка по году
df_yearly = df.groupby("Год")[["Диоксид серы", "Оксид
углерода", "Оксид азота"]].sum()
```

Следующим этапом стала визуализация пространственно-временной динамики. Она была реализована двумя средствами: в виде веб-интерфейса с использованием библиотеки *Streamlit* [9, 10], и в виде дашборда в *Microsoft Power BI* [11, 12]. Созданные компоненты включают интерактивную карту с фильтрами по году и веществу, линейные графики загрязнений и сводные таблицы с возможностью агрегирования по районам.

Пример кода построения графика динамики:

```
import matplotlib.pyplot as plt
# График по годам
plt.figure(figsize=(8, 5))
for column in df_yearly.columns:
    plt.plot(df_yearly.index, df_yearly[column], label=co-
```

```
lumn)
plt.xlabel("Год")
plt.ylabel("Суммарные выбросы (т)")
plt.title("Динамика выбросов по годам")
plt.xticks(df_yearly.index)
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Для предиктивного анализа были реализованы три модели машинного обучения: линейная регрессия, случайный лес (*Random Forest*) и метод ближайших соседей (*KNN*). Обучение моделей проводилось индивидуально для каждого муниципалитета по данным за 2020-2024 годы. Оценка точности осуществлялась с использованием метрики *MAE* (средняя абсолютная ошибка), а визуализация результатов выполнялась с помощью библиотеки *seaborn*.

Прогнозирование позволило оценить потенциальные уровни загрязнений на 2025 год и подтвердить применимость выбранных алгоритмов. На ряде районов с линейной динамикой хорошо себя показала линейная регрессия, в то время как *Random Forest* и *KNN* обеспечили лучшую точность при наличии нестабильных значений. Это соответствует международным наблюдениям о преимуществе гибридных моделей в экологических задачах [13-16].

Архитектура цифрового двойника, реали-

зованного в рамках данного проекта, включает компоненты анализа текущего состояния, визуализации и прогнозирования. Она предусматривает расширение за счёт подключения дополнительных источников – сенсоров, спутниковых данных, *API*-интерфейсов. Подобный подход соответствует лучшим практикам, представленным в зарубежных исследованиях, и делает систему пригодной как для экологического мониторинга, так и для образовательных или управленческих целей.

Результаты. В ходе исследования был создан прототип цифрового двойника, моделирующий экологическую ситуацию Пензенской области. Данные были агрегированы по муниципалитетам и пространственно привязаны с использованием координат административных центров, что обеспечило возможность как временного, так и территориального анализа.

Сформированный объединённый датасет содержал значения по основным загрязняющим веществам – диоксиду серы, оксиду углерода и оксиду азота. После обработки информация была визуализирована в двух форматах: интерактивное веб-приложение на *Streamlit*, и аналитический дашборд *Power BI*.

Визуальный функционал охватывает графики динамики, пространственные цветовые карты и сводные таблицы по годам и районам, что представлено на рисунке 1.

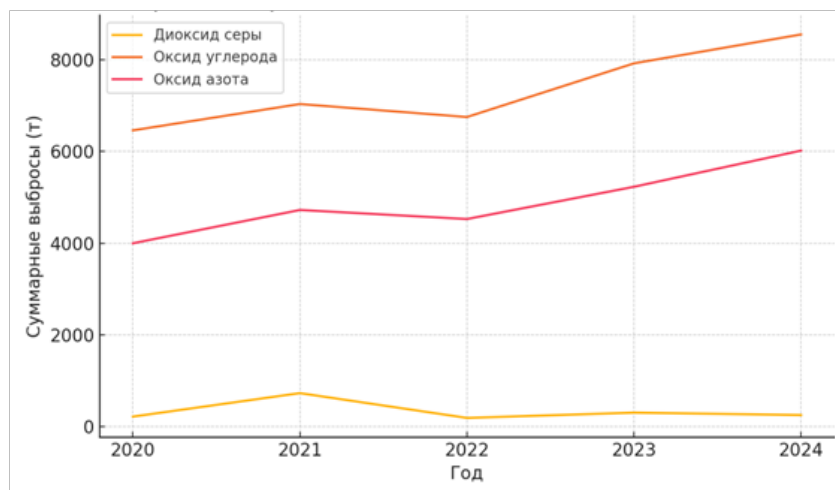


Рисунок 1 – Динамика выбросов по годам (2020-2024)

Анализ временных рядов выявил относительную стабильность по ряду районов, однако в 2023-2024 годах отмечен рост по некоторым веществам, особенно по оксиду углерода. Этот рост наиболее выражен в г. Пенза, Заречном и Кузнецком районе (рис. 2), что отражает промышленную и транспортную нагрузку.

Интерактивная карта загрязнений, реализованная с помощью *Folium*, позволила выявить смещение нагрузки в сторону ранее умеренных районов. Это может быть связано с перераспределением

хозяйственной активности. Карта в *Streamlit* позволяет пользователю выбирать интересующий год и вещество, просматривать значения и сравнивать районы по интенсивности выбросов (рис. 3-5).

```
import folium
import streamlit as st
# Центр карты
m = folium.Map(location=[53.2, 45.0], zoom_start=7)
# Добавление кругов по районам
for _, row in df.iterrows():
    folium.CircleMarker(
```

```
location=[row["lat"], row["lon"]],  
radius=5,  
color="red",  
fill=True,  
fill_opacity=0.7,  
popur=f'{row["Муниципалитет"]}: {row["Оксид  
углерода"]}'  
)  
.add_to(m)  
# Отображение в Streamlit  
st.write("Карта выбросов")  
st.components.v1.html(m._repr_html_(), height=500)
```

Следующим этапом стала реализация прогнозного модуля. Для предсказания выбросов на 2025 год использовались алгоритмы линейной регрессии, ближайших соседей (*KNN*) и случайного леса.

Модели обучались по каждому району отдельно, что обеспечило учёт локальных особенностей динамики.

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression  
import numpy as np  
# Прогноз по району  
df_co = df[["Муниципалитет", "Год", "Оксид  
углерода"]].dropna()  
forecast = []  
for name, group in df_co.groupby("Муниципалитет"):  
    x = group["Год"].values.reshape(-1, 1)  
    y = group["Оксид углерода"].values  
    if len(x) >= 2:  
        model = LinearRegression().fit(x, y)  
        y_pred = model.predict([[2025]])[0]  
        forecast.append((name, round(y_pred, 2)))
```

Следующим этапом стала реализация прогнозного модуля. Для предсказания выбросов на 2025 год использовались алгоритмы линейной регрессии, ближайших соседей (*KNN*) и случайного леса. Модели обучались по каждому району отдельно, что обеспечило учёт локальных осо-

бенностей динамики.

```
from sklearn.linear_model import LinearRegression  
import numpy as np  
# Прогноз по району  
df_co = df[["Муниципалитет", "Год", "Оксид  
углерода"]].dropna()  
forecast = []  
for name, group in df_co.groupby("Муниципалитет"):  
    x = group["Год"].values.reshape(-1, 1)  
    y = group["Оксид углерода"].values  
    if len(x) >= 2:  
        model = LinearRegression().fit(x, y)  
        y_pred = model.predict([[2025]])[0]  
        forecast.append((name, round(y_pred, 2)))
```

Полученные значения показывают, что наибольшие прогнозы приходятся на уже загруженные районы, однако в некоторых территориях выявлены потенциальные точки роста. Это подчёркивает значимость прогноза как элемента цифрового двойника.

Для оценки точности использовался показатель средней абсолютной ошибки (*MAE*). Как видно на рисунке 6, линейная регрессия эффективна при устойчивой динамике, а *Random Forest* и *KNN* показывают лучшие результаты в случаях с нелинейными колебаниями.

Дополнительно были построены графики прогнозируемых выбросов на 2025 год по каждому из трёх веществ (рис. 7-9), что расширило возможности цифрового двойника за пределы текущего анализа.

Таким образом, открытые технологии вроде *Python* и *Power BI* делают возможным внедрение системы не только в научных исследованиях, но и в образовательном процессе подготовки экспертов в области экологии, аналитики и устойчивого развития.

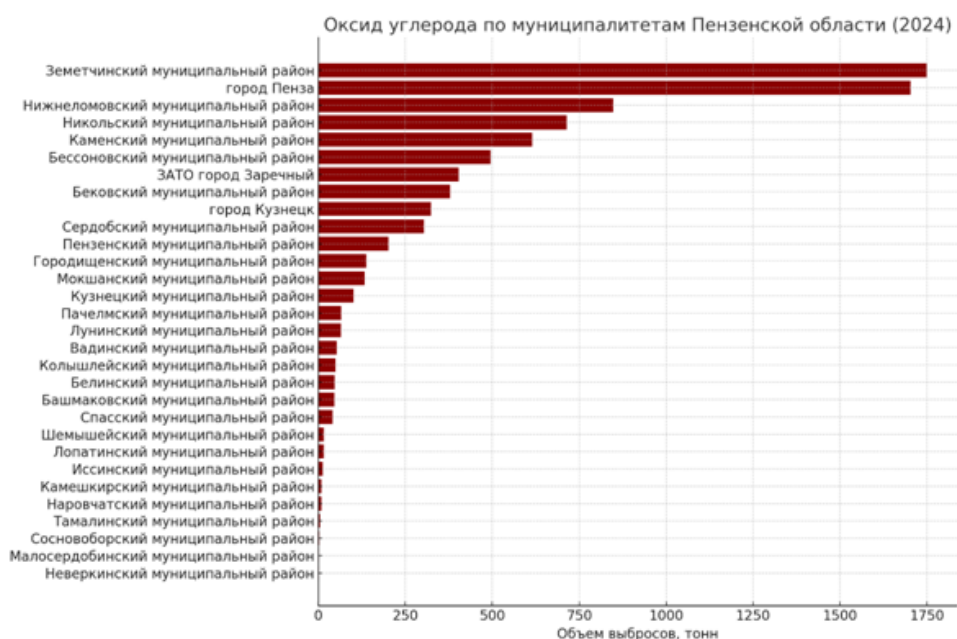


Рисунок 2 – Оксид углерода по районам (2024)

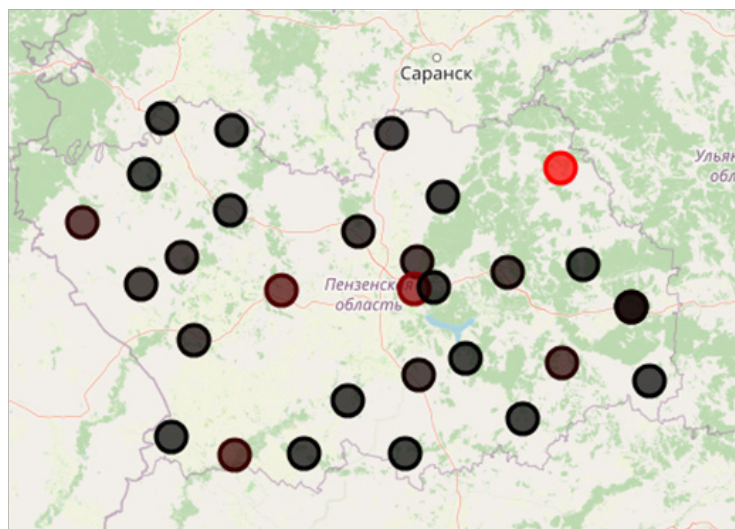


Рисунок 3 – Карта выбросов оксида углерода (2024)

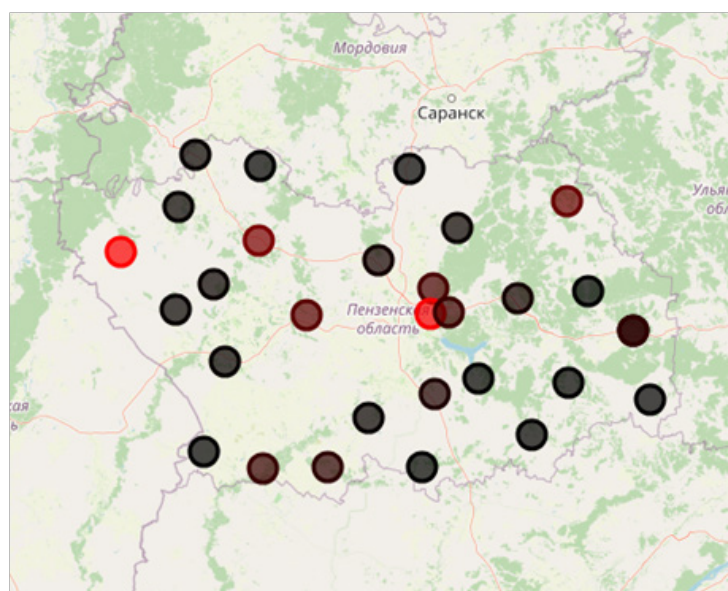


Рисунок 4 – Карта выбросов диоксида серы (2024)

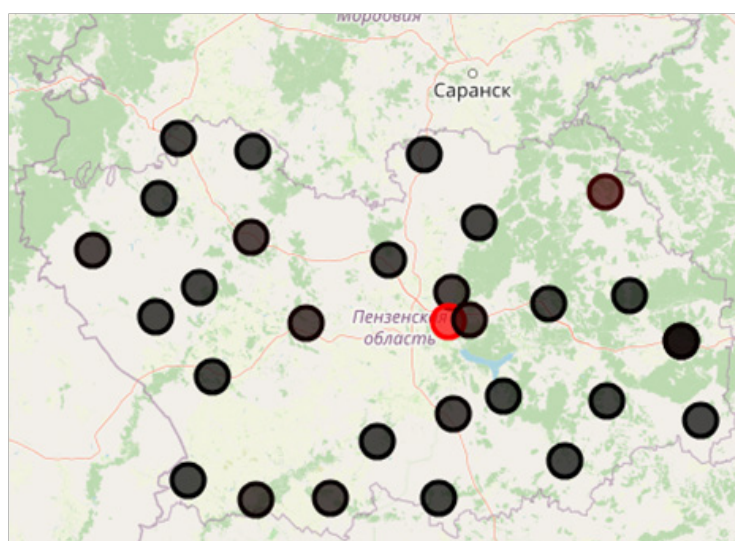


Рисунок 5 – Карта выбросов оксида азота (2024)

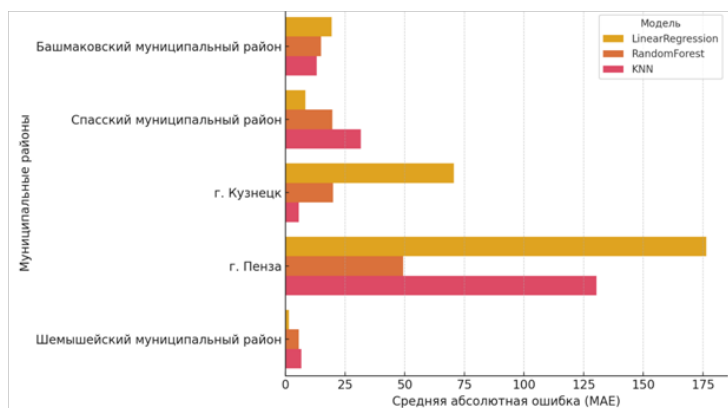


Рисунок 6 – Сравнение моделей прогнозирования по MAE (оксид углерода)

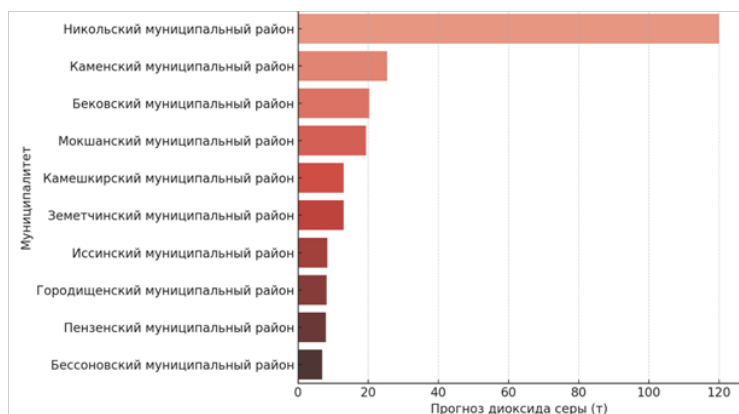


Рисунок 7 – Прогноз выбросов диоксида серы на 2025 год (топ 10 районов)

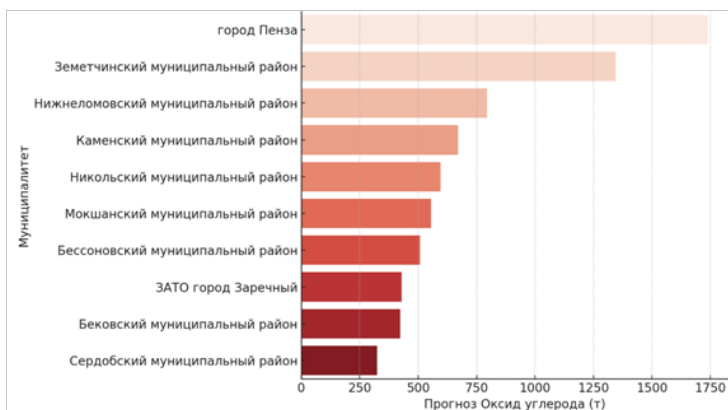


Рисунок 8 – Прогноз выбросов оксида углерода на 2025 год (топ 10 районов)

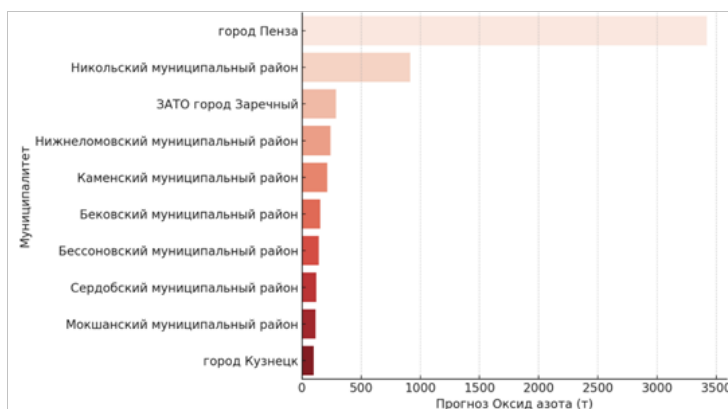


Рисунок 9 – Прогноз выбросов оксида азота на 2025 год (топ 10 районов)

Обсуждение. Полученные данные подтверждают эффективность цифрового двойника в анализе, визуализации и прогнозирования состояния региональной экологии. Модели позволяют выявлять территории с максимальным уровнем загрязнений и отслеживать динамику изменений, основываясь на официальных статистических источниках. Детализация по муниципальным образованиям обеспечивает четкую интерпретируемость результатов и повышает точность принимаемых управленческих решений.

Использование временных рядов, дополненных координатной информацией, позволило выявить закономерности, отражающие индустриальную и транспортную специфику отдельных районов. Повышение выбросов в ранее менее затронутых территориях может сигнализировать о смещении экологической нагрузки, связанной с урбанизацией или изменением хозяйственной структуры. Эти наблюдения соотносятся с результатами других региональных исследований и подчёркивают необходимость гибких стратегий экологического планирования [17-20].

Прогностические модули, основанные на линейной регрессии, случайном лесе и методе ближайших соседей, продемонстрировали адекватную точность, несмотря на ограниченный объём обучающих данных. Различия в поведении моделей по районам подтвердили важность индивидуального подхода к выбору алгоритма в зависимости от характера загрязнений и динамики показателей. Эти выводы согласуются с публикациями, посвящёнными цифровым двойникам в задачах эколого-градостроительного моделирования.

Особое значение имеет тот факт, что цифровой двойник сохраняет применимость даже в условиях неполных данных, что позволяет использовать его в регионах с ограниченной сенсорной инфраструктурой, полагаясь на исторические отчёты и ручные привязки. При этом система остаётся открытой к дальнейшему расширению, включая автоматическое обновление данных, интеграцию с метеоинформацией, спутниковыми снимками и IoT-источниками.

Выводы. Разработанный цифровой двойник подтвердил свою техническую осуществимость и показал высокую практическую ценность как эффективный инструмент пространственно-временного анализа загрязнения атмосферы региона, включающий прогностические возможности, важные для природоохранных мероприятий. Платформа объединила информацию о состоянии воздушного бассейна, географические координаты и аналитические модели для мониторинга и прогнозирования качества воздуха на локальном уровне.

Применение свободных ресурсов и методов обработки данных позволило разработать точные прогнозирующие модели даже при небольшом количестве начальных сведений. Интеграция новых

типов данных, таких как метеоданные и снимки из космоса, даёт широкие возможности для расширения функционала платформы.

Поддержка интерактивной визуализации средствами *Streamlit* и *Power BI* значительно повысила доступность системы для пользователей разных профилей – учёных, преподавателей, студентов и представителей госструктур. Это превращает цифровую платформу в важный ресурс поддержки грамотных решений в области экологии и устойчивого развития территорий.

Таким образом, представленная технология является примером успешного внедрения цифровых подходов в региональное экологическое управление и обладает значительным потенциалом для масштабирования и адаптации в других субъектах страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Валиев В.С. Создание «цифровых двойников» в рамках цифровой трансформации экологического мониторинга / В.С. Валиев, Д.В. Иванов, Д.Е. Шамаев, Р.Р. Хасанов // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – №. 3 (31). – С. 29-33.
2. Jiao J. Fire and Smoke Digital Twin--A computational framework for modeling fire incident outcomes / J. Jiao, R.H. Lewis, K. Seong, A. Farahi, P. Navratil, N. Casebeer, D. Niyogi // arXiv preprint arXiv:2305.18313. – 2023.
3. Данилов-Данильян В.И. Экология, гидрология, цифровизация, цифровые двойники и азбучные истины методологии моделирования / В.И. Данилов-Данильян // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. – 2019. – С. 497-502.
4. Цифровые двойники в прикладной науке: что это и зачем? [Электронный ресурс] // Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского». – URL: <https://www.nrczh.ru/articles/tsifrovyye-dvoyniki-v-prikladnoy-nauke-chto-eto-i-zachem/> (дата обращения: 22.05.2025).
5. Информация об охране атмосферного воздуха [Электронный ресурс] // Росприроднадзор. – URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/> (дата обращения: 22.05.2025).
6. Форма 2-ТП (воздух) – Сведения об охране атмосферного воздуха [Электронный ресурс] // ЕМИСС. – URL: <https://fedstat.ru/form/10230> (дата обращения: 22.05.2025).
7. Гусев А.В. Применение цифровых двойников для решения задач экологической безопасности / А.В. Гусев // Столыпинский вестник. – 2022. – Т. 4. – №. 6. – С. 3377-3382.
8. Грищенко Л.Л. Применение технологий «цифрового двойника» города для обеспечения безопасности его жителей / Л.Л. Грищенко, Ю.Л. Коробельникова // Baikal Research Journal. – 2022. – Т. 13. – №. 4. – С. 5.
9. Ричардс, Т. Streamlit для Data Science. Создаем интерактивные приложения в Python: практическое руководство / Т. Ричардс, А. Груздев; пер. с англ. А.В. Груздева. – Москва: ДМК Пресс, 2024. – 356 с. – ISBN 978-5-93700-275-4.
10. Визуализация и анализ зимних температур Алматы за последние сто лет на Streamlit [Электронный ресурс] // Habr. – URL: <https://habr.com/ru/articles/668672/> (дата обращения: 22.05.2025).
11. Силакова Л.В. Разработка методики автоматизации комплексного бизнес-анализа для организаций МСБ на базе MS POWER BI / Л.В. Силакова, П.А. Магерамов, М.А. Семкина // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2019. – №. 3. – С. 101-108.
12. Визуализация данных из Azure Data Explorer в Power BI с помощью SQL-запроса [Электронный ресурс] // Microsoft Learn. – URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/azure/data-explorer/power-bi/>

ta-explorer/power-bi-sql-query (дата обращения: 22.05.2025).

13. Телегина М.В. Визуализация данных системы производственного экологического мониторинга / М.В. Телегина // Прикладная информатика. – 2009. – №. 2. – С. 107-114.

14. Алибеккызы К. Геопространственный цифровой двойник приаэродромной экологической среды/ К. Алибеккызы // Вестник ВКТУ. – 2023. – №. 2. – С. 137-148.

15. A. Sharma Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions / A. Sharma, E. Kosasih, J. Zhang, A. Brintrup, A. Calinescu //arXiv preprint arXiv: 2011.02833. – 2020.

16. Степанов И.О. Применение цифрового двойника для мониторинга микроклимата в помещении / И.О. Степанов, Д.В. Крайнов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – №. 2 (68). – С. 26-36.

17. Абрамов В.И. Перспективы развития управления регионом с использованием цифровых двойников / В.И. Абрамов, А.С. Кашироков // Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения: сборник статей 11-й Международной научно-практической конференции, Курск, 24-25 июня 2021 года. Том 1. – Курск: Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Курский филиал, 2021. – С. 11-19.

18. Тельманов М.М. Создание цифровых двойников, включая модуль декарбонизации, при моделировании и визуализации систем очистки дымовых газов промышленных предприятий / М.М. Тельманов, Б.Х. Хусаин, А.Х. Хусаин, А.Р. Бродский // «Доклады НАН РК». – 2024. – №. 4. – С. 179-194.

19. Цифровой двойник поможет управлять городским хозяйством [Электронный ресурс] // Минстрой РФ. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/tsifrovoy-dvoynik-pomozhet-upravlyat-gorodskim-khozyaystvom/> (дата обращения: 22.05.2025).

20. ТГУ применил цифровые сервисы для снижения загрязнения воздуха в Тольятти [Электронный ресурс] // Российская газета. – URL: <https://rg.ru/2022/12/27/reg-pfo/tgu-primenil-cifrovyie-servisy-dlia-snizheniia-zagrizneniia-vozduha-v-toliatti.html> (дата обращения: 22.05.2025).

Статья поступила в редакцию 06.05.2025

Статья принята к публикации 17.06.2025