18+

vek21.penzgtu.ru

ISSN 2221-951X

XXI век: ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО плюс

2025

№3(71) т.14

Основан в 2011 г.

18+

XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Том 14
№ 3 (71)
2025

Журнал выходит
4 раза в год

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

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

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

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

Заместители главного редактора:
Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент
Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент
Пащенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор
Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор
Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент

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

Ответственный секретарь
Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 19.09.2025.
Выход в свет 26.09.2025.
Формат 60X84 1/8
Печать ризография.
Усл. печ. л. 26,2.
Тираж 100 экз. Заказ № 355.

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

Цена свободная

© ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет, 2025

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

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

Заместители главного редактора:
Авроров Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Пищевые производства»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)
Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»
(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)
Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела пищевых систем и биотехнологий, главный научный сотрудник
(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук,
Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)
Пащенко 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. Салавате), 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 автоматики и информационных технологий *(Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия)*
Давыденко Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и организация общественного питания» *(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)*
Дмитриев Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, информационных технологий и методики обучения техническим дисциплинам
(Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Челябинск, Россия)
Зинкин Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Вычислительная техника»
(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)
Зыбина Ольга Александровна, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника по научной работе *(Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Россия)*

Иващенко Антон Владимирович, доктор технических наук, профессор, директор Передовой медицинской инженерной школы *(Самарский государственный медицинский университет, г. Самара, Россия)*
Квятковская Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой «Высшая и прикладная математика»
(Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия)
Косников Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» *(Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия)*
Кручинина Наталия Евгеньевна, доктор технических наук, профессор, декан факультета биотехнологии и промышленной экологии, заведующий кафедрой «Промышленная экология» *(Российский государственный химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)*
Куликовских Илона Марковна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и технологий *(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия)*
Мамедова Тарана Аслан кызы, доктор технических наук, профессор, заместитель директора
(Институт Нефтехимических процессов НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан)
Маскевич Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, директор *(Международный государственный экологический институт им.А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета, г.Минск, Республика Беларусь)*
Махмудова Любовь Ширваниевна, доктор технических наук, профессор, директор
(Институт нефти и газа, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г.Грозный, Чеченская Республика)
Милентьева Ирина Сергеевна, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры бионанотехнологии *(Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия)*
Михеев Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» *(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Петрова Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и моделирования
(Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия)
Прохоров Сергей Антонович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии»
(Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева, г. Самара, Россия)
Рожнов Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры пищевой инженерии *(Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия)*
Рыбаков Анатолий Валерьевич, доктор технических наук, профессор, начальник научно-исследовательского центра Академия гражданской защиты *(Академия гражданской защиты МЧС России, г. Москва, Россия)*
Стороженко Павел Аркадьевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор химических наук, профессор, управляющий директор ГНЦ РФ «Государственный ордена Трудового Красного Знамени НИИ химии и технологии элементоорганических соединений», профессор кафедры химии и технологии элементоорганических соединений
(Московский институт тонкой химической технологии имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)
Танклевский Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пожарная безопасность»
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Высшая школа техносферной безопасности, г. Санкт-Петербург, Россия)
Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность» *(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)*
Тихомирова Елена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность» *(Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, Россия)*
Шалагин Сергей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Компьютерные системы»
(Казанский Национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, г. Казань, Россия)
Черный Константин Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» *(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия)*
Школьникова Марина Николаевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии питания
(Уральский государственный экономический университет, г. Екатеринбург, Россия)

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ОРГАНИЗАЦИЯ КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ИСПОЛНИМЫМИ МОДЕЛЯМИ. ЛОГИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИМЫЕ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
Петушков Григорий Валерьевич, Сигов Александр Сергеевич.....10

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОТКРЫТЫХ СПУТНИКОВЫХ КАРТАХ
Валько Александр Фёдорович, Бурукина Ирина Петровна.....23

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ СЕТИ *U-NET* В АППАРАТНО-ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
Блинников Александр Вениаминович.....31

РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗИРОВАННОГО АНСАМБЛЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ МУЛЬТИЗАДАЧНОЙ ДИАГНОСТИКИ ФИБРОЗА И СТЕАТОЗА ПЕЧЕНИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПОЭТАПНЫЙ ПОДХОД
Попова Ольга Александровна, Хамитов Рустам Нуриманович.....41

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ С ПОВЫШЕННОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬЮ
Петушков Григорий Валерьевич, Сигов Александр Сергеевич.....55

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ *RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION* ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ
Воробьев Никита Григорьевич.....65

ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ НАБОРА ДАННЫХ И ЕГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ В ЗАДАЧАХ ОБУЧЕНИЯ СВЁРТОЧНЫХ СИАМСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО АЭРОФОТОСЪЕМКЕ
Костров Борис Васильевич, Бабаев Сергей Игоревич, Тарасова Валентина Юрьевна.....70

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АУДИОКОДЕКОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТРИК ВОСПРИЯТИЯ
Кирпичев Денис Сергеевич.....78

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИМИТАТОР ГРУДНЫХ СОКРАЩЕНИЙ УЧЕБНОГО МАНЕКЕНА
Чулков Валерий Александрович.....85

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ АРСЕНИДА БОРА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
Вершинин Егор Андреевич.....91

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОЖЕВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ
Гбоу Микаэл Урлиш Эрман Гойон, Костров Борис Васильевич.....97

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕКТИНАЗЫ ДЛЯ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ АНТОЦИАНОВ ИЗ ЯГОДНОГО СЫРЬЯ
Чеснокова Наталья Юрьевна, Кузнецова Алла Алексеевна, Приходько Юрий Вадимович.....104

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЫКВЕННОГО ПОРОШКА НА КАЧЕСТВО РЖАНО-ПШЕНИЧНЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА РЖАНЫХ ЗАКВАСКАХ
Леонтьева Светлана Александровна, Гулова Тамара Ивановна.....111

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕРНОПЛОДНОЙ РЯБИНЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОМАДНОЙ НАЧИНКИ
Тимакова Роза Темерьяновна, Неустроев Антон Павлович.....117

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ОБ УТОЧНЁННОМ РАСЧЁТЕ ОРОШЕНИЯ СТЕЛЛАЖЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ
Танклевский Леонид Тимофеевич, Аракчеев Александр Валерьевич, Таранцев Александр Алексеевич.....123

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ОГНЕТУШАЩИХ И ЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ
Киселева Виктория Сергеевна, Иванов Алексей Владимирович.....128

РАЗРАБОТКА ШКАЛЫ УРОВНЕЙ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОМ ДЕЛЬФИ
Кулешов Владимир Владимирович, Богданов Андрей Владимирович.....133

ДОБРОВОЛЬНАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ В ОХРАНЕ ТРУДА: ИНСТИТУЦИОНАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ, МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ ВЫЗОВЫ
Кузнецова Екатерина Анатольевна, Молебнов Георгий Владимирович.....138

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА И ФАКТОРОВ РИСКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ УЧЕБНОЙ И ВНЕУЧЕБНОЙ ЗАНЯТОСТИ СТУДЕНТОВ
Климова Елена Владимировна, Семейкин Александр Юрьевич, Черкасов Роман Андреевич, Петрова Виктория Александровна.....145

УПРАВЛЕНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ФАКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *VR*-ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА
Андреев Андрей Викторович, Шавуров Сергей Алексеевич.....153

ПРИЕМЫ КОНЦЕПЦИИ «БЕЗОПАСНОСТЬ-II» КАК СПОСОБ ПРОФИЛАКТИКИ СТРЕССА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ
Зубкова Аделина Дамировна, Хайруллина Ляйсан Исмагиловна.....158

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВОДОРОДНОГО АВТОТРАНСПОРТА
Торопкин Александр Иванович, Королева Людмила Анатольевна.....167

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОДУЛЬНЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
Таранцев Александр Алексеевич, Ищенко Андрей Дмитриевич, Таранцев Андрей Александрович.....176

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВИДЕОКАМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕРРИТОРИИ ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
Богданов Андрей Владимирович, Демина Александра Денисовна.....183

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ
Дементьева Юлия Васильевна, Плицына Ольга Витальевна.....188

МНОГОСЛОЙНАЯ БИОТКАНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
Сергеева Маргарита Дмитриевна, Колесников Евгений Юрьевич.....193

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТРУДА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ
Горбунова Ольга Владимировна, Нам Галина Евгеньевна, Падерно Павел Иосифович.....203

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ СОТРУДНИКОВ ДЛЯ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ РАБОТ
Борисова Анастасия Викторовна, Баланова Марина Васильевна, Козлюк Виталий Викторович, Фирсов Виктор Анатольевич.....213

ВАЛИДАЦИЯ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В КАБИНЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КРАНА
Булыгин Юрий Игоревич, Масленский Виктор Валерьевич, Ашихмин Денис Валерьевич.....220

ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННОЙ ФИЗИКО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
Максименко Александр Федорович, Староконь Иван Викторович, Куликов Арсений Владимирович.....228

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ЗНАЧЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ФАЗНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ
Баширов Мусса Гумерович, Дюльдин Никита Денисович.....235

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО ПОЛУПРОДУКТА ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАМОВ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
Сомова Юлия Васильевна, Свиридова Татьяна Валерьевна, Игнатьева Елена Александровна.....246

МЕХАНИЗМ СОРБЦИИ НИКЕЛЯ НА АКТИВИРОВАННОМ УГЛЕ ИЗ ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПИРОЛИЗА ИЗНОШЕННЫХ ШИН
Таранцева Клара Рустемовна, Худойбердиев Максуджон Саиджон-Угли.....258

ОБОСНОВАНИЕ ПОНЯТИЯ «РАЗВЕТВЛЁННЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
Дюкин Ильяс Рафаилевич, Сидоров Александр Иванович, Богданов Андрей Владимирович.....267

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ЭРГОНОМИКЕ РАБОЧЕГО МЕСТА
Кондратьева Ольга Евгеньевна, Васильева Наталья Владимировна, Матыцин Андрей Викторович.....275

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА РАБОТНИКОВ С ВЫСОКИМ РИСКОМ ПАДЕНИЯ С ВЫСОТЫ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ДЕЙСТВИЙ
Субботина Надежда Андреевна, Никулин Андрей Николаевич.....282

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ С ТЕРРИТОРИАЛЬНО МЕНЯЮЩИМИСЯ РАБОЧИМИ ЗОНАМИ
Логвинова Юлия Валерьевна, Ульянов Алексей Игоревич, Полюхович Максим Алексеевич, Румянцева Нина Вячеславовна.....290

CONTENT

INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLING

ORGANIZATION OF CLUSTER COMPUTING SYSTEMS WITH FUNCTIONAL ARCHITECTURE DEFINED BY EXECUTIVE MODELS. LOGICAL-ALGEBRAIC EXECUTIVE MODELS OF INFORMATION PROCESSING
Petushkov Grigory Valerievich, Sigov Alexander Sergeevich.....10

NAVIGATION SYSTEM BASED ON OBJECT RECOGNITION IN OPEN SATELLITE MAPS
Valko Alexander Fedorovich, Burukina Irina Petrovna.....23

APPLICATION OF THE U-NET GENERATIVE ADVERSARIAL NETWOR IN THE HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF DIGITAL TECHNOLOGY SUPPORT FOR NON-LINEAR IMAGE POST-PROCESSING
Blinnikov Alexander Veniaminovich.....31

DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZED ENSEMBLE METHOD FOR MULTITASKING DIAGNOSIS OF LIVER FIBROSIS AND STEATOSIS: COMPARATIVE ANALYSIS AND STEP-BY-STEP APPROACH
Popova Olga Aleksandrovna, Khamitov Rustam Nurimanovich.....41

FUNCTIONAL ORGANIZATION OF COMPUTING CLUSTERS WITH INCREASED FAULT TOLERANCE
Petushkov Grigory Valerievich, Sigov Alexander Sergeevich.....55

THE USE OF RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION METHODS FOR AUTOMATING NETWORK INFRASTRUCTURE ANALYSIS
Vorobyev Nikita Grigorievich.....65

ISSUES TO THE DATA SET FORMATION AND PREPROCESSING IN THE TRAINING CONVOLUTIONAL SIAMESE NEURAL NETWORKS TASKS FOR AN AIRCRAFT POSITION CORRECTING BASED ON AERIAL PHOTOGRAPHY
Kostrov Boris Vasilyevich, Babaev Sergey Igorevich, Tarasova Valentina Yurievna.....70

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC AUDIO CODEC QUALITY TESTING SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORKS AND PERCEPTION METRICS
Kirpichev Denis Sergeevich.....78

ELECTROMECHANICAL CHEST CONTRACTIONS SIMULATOR OF A TRAINING MANNEQUIN
Chulkov Valery Alexandrovich.....85

COMPOSITE MATERIALS RESEARCH BORON ARSENIDE COMPOSITES FOR IMPROVING THERMAL PERFORMANCE
Vershinin Egor Andreevich.....91

RESEARCH OF WAVELET ANALYSIS ALGORITHMS FOR DETERMINING DEFECTS IN LEATHER PRODUCTS
Gbohou Michael Ulrich Hermann Goyon, Kostrov Boris Vasilevich.....97

FOOD TECHNOLOGY

EFFICIENCY OF USING PECTINASE FOR EXTRACTING ANTHOCYANINS FROM BERRY RAW MATERIALS
Chesnokova Natalya Yurievna, Kuznetsova Alla Alekseevna, Prikhodko Yuri Vadimovich.....104

A STUDY OF THE IMPACT OF PUMPKIN ON THE QUALITY OF BAKERY PRODUCTS DERIVED FROM RYE SOURDOUGH STARTER
Leontieva Svetlana Aleksandrovna, Gulova Tamara Ivanovna.....111

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION OF FUNCTIONAL-PURPOSE POMADE FILLING
Timakova Roza Temer'janovna, Neustroev Anton Pavlovich.....117

TECHNOSPHERE SAFETY

ABOUT THE UPDATED CALCULATION OF IRRIGATION OF RACKS BY AUTOMATIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS
Tanklevsky Leonid Timofeevich, Arakcheev Alexander Valerievich, Tarantsev Alexander Alexeevich.....123

INFLUENCE OF CARBON NANOMODIFIERS ON THERMAL STABILITY OF FIRE EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOSITIONS
Kiseleva Victoria Sergeevna, Ivanov Alexey Vladimirovich.....128

DEVELOPMENT OF A SCALE OF SAFETY CULTURE LEVELS USING THE DELPHI METHOD
Kuleshov Vladimir Vladimirovich, Bogdanov Andrey Vladimirovich.....133

VOLUNTARY CERTIFICATION IN OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH: INSTITUTIONAL EVOLUTION, INTERNATIONAL EXPERIENCE AND NATIONAL CHALLENGES
Kuznetsova Ekaterina Anatolevna, Molebnov Georgiy Vladimirovich.....138

ANALYSIS OF THE CAUSES OF OCCUPATIONAL INJURIES AND RISK FACTORS FOR DIFFERENT TYPES OF STUDENTS' ACADEMIC AND EXTRACURRICULAR EMPLOYMENT
Klimova Elena Vladimirovna, Semeikin Alexander Yuryevich, Cherkasov Roman Andreevich, Petrova Victoria Aleksandrovna.....145

HUMAN FACTOR MANAGEMENT USING VR TECHNOLOGIES IN THE LABOR SAFETY SYSTEM
Andreev Andrey Viktorovich, Shavurov Sergey Alekseevich.....153

TECHNIQUES OF THE "SAFETY-II" CONCEPT AS A WAY TO PREVENT STRESS IN THE WORKPLACE
Zubkova Adelina Damirovna, Khairullina Liaisan Ismagilovna.....158

FIRE AND EXPLOSION SAFETY ASSESSMENT SYSTEM FOR HYDROGEN VEHICLES
Toropkin Aleksandr Ivanovich, Koroleva Ludmila Anatolyevna.....167

APPLIED ISSUES OF MODELING FIRE PROTECTION SYSTEMS USING MARKOV CHAINS
Tarantsev Alexander Alekseevich, Ishchenko Andrey Dmitrievich, Tarantsev Andrey Alexandrovich.....176

DETERMINATION OF CAMERA PLACEMENT SCHEME FOR PROTECTING TERRITORY FROM FOREST FIRES
Bogdanov Andrey Vladimirovich, Demina Aleksandra Denisovna.....183

SUBSTANTIATING THE GEOMETRY OF CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF THE VENTLATION SYSTEMS NOISE REFLECTIVE SILENCER
Dementieva Yulia Vasil'evna, Plitsyna Olga Vital'evna.....188

MULTI-LAYER FABRIC MODEL TRANSMISSION OF INFRARED RADIATION
Sergeeva Margarita Dmitrievna, Kolesnikov Evgeniy Yuryevich.....193

EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF INNOVATIVE DIGITAL SOLUTIONS FOR SAFETY MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY
Gorbunova Olga Vladimirovna, Nam Galina Evgenievna, Paderno Pavel Iosifovich.....203

METHODS OF FORECASTING THE PROFESSIONAL SUITABILITY OF EMPLOYEES FOR DANGEROUS AND HARMFUL WORK
Borisova Anastasia Viktorovna, Balanova Marina Vasilyevna, Kozlyuk Vitaly Viktorovich, Firsov Viktor Anatolyevich.....213

VALIDATION OF AN AEROTHERMODYNAMIC MODEL FOR DETERMINING THE MICROCLIMATE PARAMETERS IN A RAILWAY CRANE CABIN
Bulygin Yuri Igorevich, Maslensky Viktor Valerievich, Ashikhmin Denis Valerievich.....220

APPLICATION OF A HYBRID PHYSICS-NEURAL NETWORK MODEL FOR THE ANALYSIS OF FATIGUE LIFE OF REPAIRED WELDED JOINTS
Maksimenko Aleksandr Fedorovich, Starokon Ivan Viktorovich, Kulikov Arsenii Vladimirovich.....228

DETERMINATION OF THE FIRE HAZARD LEVEL OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES BASED ON THE VALUES OF HARMONIC PARAMETERS, PHASE CURRENTS AND VOLTAGES
Bashirov Mussa Gumerovich, Diuldin Nikita Denisovich.....235

THE USE OF IRON-CARBON INTERMEDIATES FROM METALLURGICAL SLUDGE IN THE FOUNDRY IN ORDER TO REDUCE THE BURDEN ON THE ENVIRONMENT
Somova Yulia Vasilyevna, Sviridova Tatiana Valeryevna, Ignatieva Elena Alexandrovna.....246

MECHANISM OF NICKEL SORPTION ON ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SOLID PYROLYSIS RESIDUE OF WORN TIRES
Tarantseva Klara Rustemovna, Khudoyberdiev Maksudzhon Saidzhon-Ugli.....258

SUBSTANTIATION OF THE CONCEPT OF "EXTENSIVE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS" TO IMPROVE THE LEVEL OF OCCUPATIONAL SAFETY DURING THE OPERATION OF OVERHEAD LINES
Dyukin Ilyas Rafailevich, Sidorov Alexander Ivanovich, Bogdanov Andrey Vladimirovich.....267

ANALYSIS OF THE MAIN REQUIREMENTS OF REGULATORY AND TECHNICAL DOCUMENTS FOR WORKPLACE ERGONOMICS
Kondratyeva Olga Evgenevna, Vasilyeva Natalya Vladimirovna, Matytsin Andrey Viktorovich.....275

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE PROFESSIONAL RISK OF WORKERS WITH HIGH RISK OF FALLING FROM HEIGHT BASED ON MONITORING HAZARDOUS ACTIONS
Subbotina Nadezhda Andreevna, Nikulin Andrey Nikolaevich.....282

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE PERFORMANCE OF THE PRODUCTION ENVIRONMENT IN WORKPLACES WITH GEOGRAPHICALLY CHANGING WORK ZONES
Logvinova Yulia Valeryevna, Uljanov Alexey Igorevich, Polyukhovich Maxim Alekseevich, Rumyantseva Nina Vyacheslavovna.....290

УДК 004.9:681.3
EDN: GJCJUQ

ОРГАНИЗАЦИЯ КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ИСПОЛНИМЫМИ МОДЕЛЯМИ. ЛОГИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИМЫЕ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 4985-4344
ORCID: 0009-0006-0801-429X

ПЕТУШКОВ Григорий Валерьевич, проректор
МИРЭА – Российский технологический университет
(119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: petushkov@mirea.ru)

SPIN: 2869-5663
AuthorID: 17622
ORCID: 0000-0002-1216-3339

СИГОВ Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН, президент
МИРЭА – Российский технологический университет
(119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: sigov@mirea.ru)

Аннотация. Рассмотрены методы построения исполнимых моделей для произвольных приложений. Эти модели предполагается использовать в качестве формализованных спецификаций при разработке реальных приложений. Рассмотрены логико-алгебраические операционные модели (ЛАОВ) функционирования приложений кластерных систем в режиме *SPMD* (*Single Program, Multiple Data* – одиночный поток программ, множественный поток данных) и в режиме *MPMD* (*Multiple Programs, Multiple Data* – множественный поток программ, множественный поток данных). На основе исполнимых моделей рассмотрено выполнение на кластере последовательно-параллельных и параллельно-конвейерных приложений с реализаций произвольных алгоритмов. Модели вида ЛАОВ берут свое начало от систем алгоритмических алгебр, логических (бинарных) сетей Петри и сетей абстрактных машин. Цель работы – внедрение новых подходов к проектированию функциональной архитектуры кластерных и других вычислительных систем, управляемой новыми исполнимыми моделями, для ускорения сроков, отводимых на предметную ориентацию кластерных вычислительных систем на основных уровнях абстракции, от концептуального представления до деталей реализации. На основе статистических экспериментов с исполнимыми моделями получены основные характеристики, характеризующие эффективную работу кластеров при различных нагрузках. Проведенные эксперименты с моделями кластерных приложений и последующее программирование прототипных работающих приложений показали реализуемость и эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: вычислительная система кластерного типа, приложение промежуточного уровня, функциональная архитектура, логико-вероятностная модель, логико-алгебраическая модель, режимы обработки запросов, результаты моделирования.

ORGANIZATION OF CLUSTER COMPUTING SYSTEMS WITH FUNCTIONAL ARCHITECTURE DEFINED BY EXECUTIVE MODELS. LOGICAL-ALGEBRAIC EXECUTIVE MODELS OF INFORMATION PROCESSING

© Author(s) 2025

PETUSHKOV Grigory Valerievich, vice-rector
MIREA – Russian Technological University
(119454, Russia, Moscow, Vernadsky Ave., 78, e-mail: petushkov@mirea.ru)

SIGOV Alexander Sergeevich, doctor of physical and mathematical sciences,
professor, academician of the Russian Academy of Sciences, President
MIREA – Russian Technological University
(119454, Russia, Moscow, Vernadsky Ave., 78, e-mail: sigov@mirea.ru)

Abstract. The methods of constructing executable models for arbitrary applications are considered. These models are supposed to be used as formalized specifications when developing real applications. The logical-algebraic operational models (LAOM) of functioning of cluster system applications in SPMD (Single Program, Multiple Data) mode and in MPMD (Multiple Programs, Multiple Data) mode are considered. Based on executable models, execution of sequential-parallel and parallel-pipeline applications with implementations of arbitrary algorithms on a cluster is considered. LAOM models originate from systems of algorithmic algebras, logical (binary) Petri nets and networks of abstract machines. The aim of the work is to introduce new approaches to designing the functional architecture of cluster and other computing systems controlled by new executable models in order to accelerate the time allocated for the subject orientation of cluster computing systems. A new set of recommendations for structuring specifications expressed as models is proposed. The main result of interpreting the proposed models and methods is the possibility of using them as

formalized specifications when describing parallel processes in cluster computing systems and networks at the level of tasks, data, algorithms, and machine instructions, i.e., at the main levels of abstraction, from conceptual representation to implementation details. Based on statistical experiments with executable models, the main characteristics characterizing the efficient operation of clusters under various loads were obtained. The experiments with cluster application models and subsequent programming of prototype running applications demonstrated the feasibility and efficiency of the proposed approach.

Keywords: cluster computing system, intermediate level application, functional architecture, logical-probabilistic model, logical-algebraic model, query processing modes, modeling results.

Для цитирования: *Петушков Г.В. Организация кластерных вычислительных систем с функциональной архитектурой, определяемой исполнимыми моделями. Логико-алгебраические исполнимые модели обработки информации / Г.В. Петушков, А.С. Сигов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 10-22. – EDN: GJCJUQ.*

Введение. Вычислительный кластер – это распределенная вычислительная система, обычно построенная на базе серийно выпускаемого промышленностью компьютеров, связанных сетями *Ethernet*, *Myrinet, InfiniBand* или другими относительно недорогими сетями. Такие кластеры принято относить к классу кластеров *Beowulf*. Один из самых ранних примеров такой системы – *Stone Soupercomputer.* Еще одной характерной особенностью вычислительных кластеров является то, что кластеры как параллельные системы формируются на уровне приложений, связанным с уровнем кластерного промежуточного обеспечения *middleware* [1].

Большинство вычислительных систем, называемых вычислительными кластерами, содержат компьютеры одного типа, что в существенной степени упрощает управление системой. За счет объединения вычислительных ресурсов кластеры, как правило, обеспечивают более высокую производительность по сравнению с отдельно стоящими компьютерами. Наличие резервных компьютеров в кластере позволяет повысить его отказоустойчивость. Кластер удовлетворяет требованиям пользователя, если его программная система позволяет автоматически отключать неисправный компьютер и заменять его на резервный [2].

Актуальной задачей является использование преимуществ кластерных вычислений по сравнению с грид-вычислениями за счет выбора наиболее подходящей модели организации функциональной архитектуры. Основное различие состоит в том, что в кластерах чаще всего организуется централизованное управление ресурсами, в том числе посредством произвольного компьютера кластера, а в грид-системах обычно используется распределенное управление ресурсами. Грид-системы строятся для разных групп пользователей и нередко предназначаются для использования в качестве коммунального ресурса, а специализированные кластеры чаще предметно ориентированы на конкретного пользователя [3].

Кластерные вычислительные системы могут в принципе иметь различные топологии. Например отечественная сеть Ангара имеет топологию «многомерный тор» и создана на базе российской СБИС. Она сопоставима по своей функциональности, производительности и надежности с современными разработками в данной области (*Cray, IBM, Mellanox*) [4, 5].

В работах [6, 7] проведено сравнение кластерных вычислительных систем с грид системами, пиринговыми и облачными системами; утверждается, что кластерные компьютерные системы при обработке большой рабочей нагрузке с большими наборами данных продемонстрировали приемлемые результаты. Они отличаются простотой реализации и управляемостью Отмечается, что промежуточное программное обеспечение *middleware* кластера в значительной степени способно обеспечить целостный и унифицированный образ системы. В работе [8] отмечается особая пригодность кластеров для реализации приложений баз данных, в силу использования однородного программного обеспечения. Следующие преимущества кластерных систем отмечаются в работе [9]: программное обеспечение автоматически устанавливается и настраивается, узлы кластера можно добавлять и ими легко управлять, поэтому его можно легко развернуть. Утверждается также, что это открытая система, и ее очень выгодно приобретать. Кластеры имеют много источников поддержки и поставок, отличаются скоростью и гибкостью; многие системы оптимизированы для производительности, и в них можно изменять конфигурации программного обеспечения.

Большое число вычислительных кластеров средней и низкой стоимости создается на основе разного рода коммутаторов, в том числе коммутаторов *Ethernet*. Обычно с этой целью используется инфраструктура на базе локальной сети для последующего включения вычислительного кластера через коммутаторы *L2* (подключение «классических» кластеров с аппаратными адресами на уровне доступа) или *L3* (подключение с использованием *IP*-адресов на уровнях агрегации или ядра).

На рисунке 1 представлен вариант вычислительного кластера на базе инфраструктуры локальной сети. Данная сеть дооборудована частной сетью на основе коммутаторов *Infiniband, Myrinet* или *Ethernet* для взаимодействия рабочих станций, а также сетью хранения данных. Подобные кластеры иногда

называются *Cluster of Workstations* (*COW*), то есть кластеры рабочих станций.

В представленном примере организации вычислительного кластера и его инфраструктуры трафики различных локальных сетей могут пересекаться, если это не затрудняет выполнение основной функции узлов кластера. Узлы кластера *Y1-Y16* (рабочие узлы) и *Y17-Y22* (резервные узлы) обрабатывают пользовательскую нагрузку; *Y0*, *R0* – управляющие (основной и резервный) узлы, отслеживающие состояние аппаратного и программного обеспечения кластера и принимающие действия по его перенастройке в связи с каким-либо событием, происходящим в кластере; *M1*, *M2* – общие резервные хранилища, в которых хранится информация, доступная всем узлам кластера через сервер или коммутатор и используемая ими для доступа к общим данным, в том числе к данным о вышедшем из строя узле, которыми может воспользоваться резервный узел; *S1*, *S2* – серверы, доступные по общедоступной и клиентской сетям. Коммутатор уровня *L2* частной сети осуществляет обмен данными между узлами кластера, используя аппаратные *MAC*-адреса. По частной сети передаются командные сообщения, используемые узлами для проверки работоспособности, перенастройки и синхронизации кластера.

Коммутатор уровня *L3* общедоступной сети осуществляет обмен данными, используя межсетевые *IP* или аппаратные *MAC*-адреса. На уровне общедоступной сети виртуализируется доступ к кластеру, как к единой системе. Локальная сеть, построенная на основе коммутатора уровня *L2+* с добавленными функциями, обеспечивает доступ клиентов к кластеру.

Наличие в инфраструктуре вычислительного кластера нескольких сетевых коммутаторов позволяет использовать три основных вида сетей: коммуникационный, транспортный и сервисный.

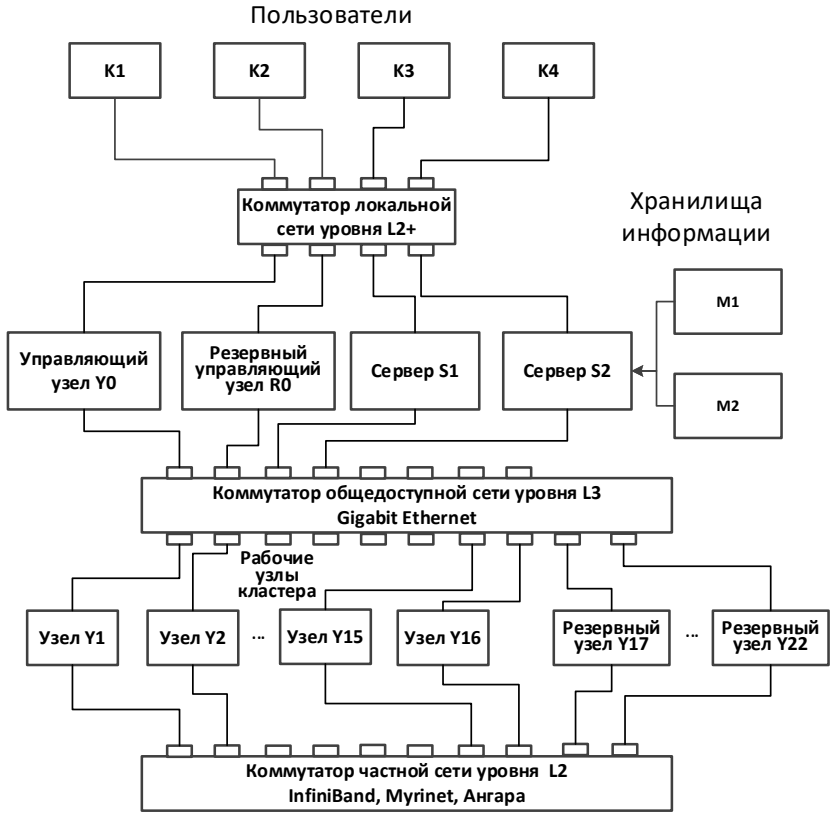


Рисунок 1 – Типовая архитектура вычислительного кластера, встроенного в инфраструктуру локальной вычислительной сети

Методология. Разработаны новые логико-алгебраические операционные модели (ЛАОВ) функционирования кластерных систем в режиме *SPMD* (*Single Program, Multiple Data* – одиночный поток программ, множественный поток данных) и в других режимах. Модели вида ЛАОВ берут свое начало от систем алгоритмических алгебр [10, 11], логических (бинарных) сетей Петри [12] и сетей абстрактных машин [13]. Используются логико-алгебраические операционные выражения (ЛАОВ), построенные на основе суперпозиции α-дизъюнкций, определенных в алгебре операторов [10, 11]. Можно было бы ограничиться и обычной записью ЛАОВ в виде продукционных правил, но суперпозиции операторов, введенные в системах алгоритмических алгебр, и аналитическая форма записи выражений [10, 11] просты и удобны для последующей программной реализации. Используемая в настоящей работе расширенная нотация ЛАОВ была предложена в работах [14, 15].

Система логико-алгебраических операционных выражений для последовательного участка клас-

терного приложения. Данная система ЛАОВ составляется на основе метода перехода от графов переходов состояний к автоматным сетям Петри, который был ранее описан в ряде работ [16, 17]. Метод состоит в простановке переходов на дугах и расстановке меток на вершинах графа переходов, рассматриваемых как позиции. Ввиду простоты этого метода, на начальных этапах достаточно при переходе от автоматных 1-ограниченных логических сетей Петри к построению ЛАОВ продукционного вида использовать только граф переходов частичного автомата, представленный на рисунке 2 и графы переходов сети частичных автоматов на рисунке 3. На заключительных этапах тестирования моделей при исследовании их динамики рекомендуется использовать непосредственно логические сети Петри.

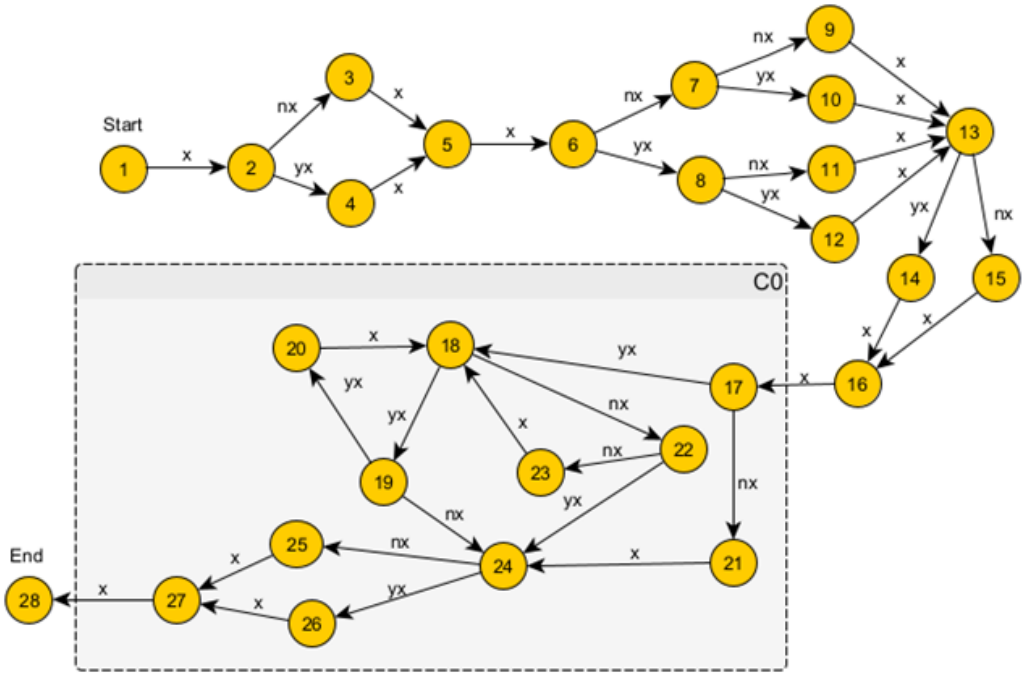


Рисунок 2 – Граф переходов состояний автоматной модели последовательного приложения L_{Seq}: выделен участок C0, предназначенный для последующего клонирования при переходе к режиму SPMD (Single Program, Multiple Data)

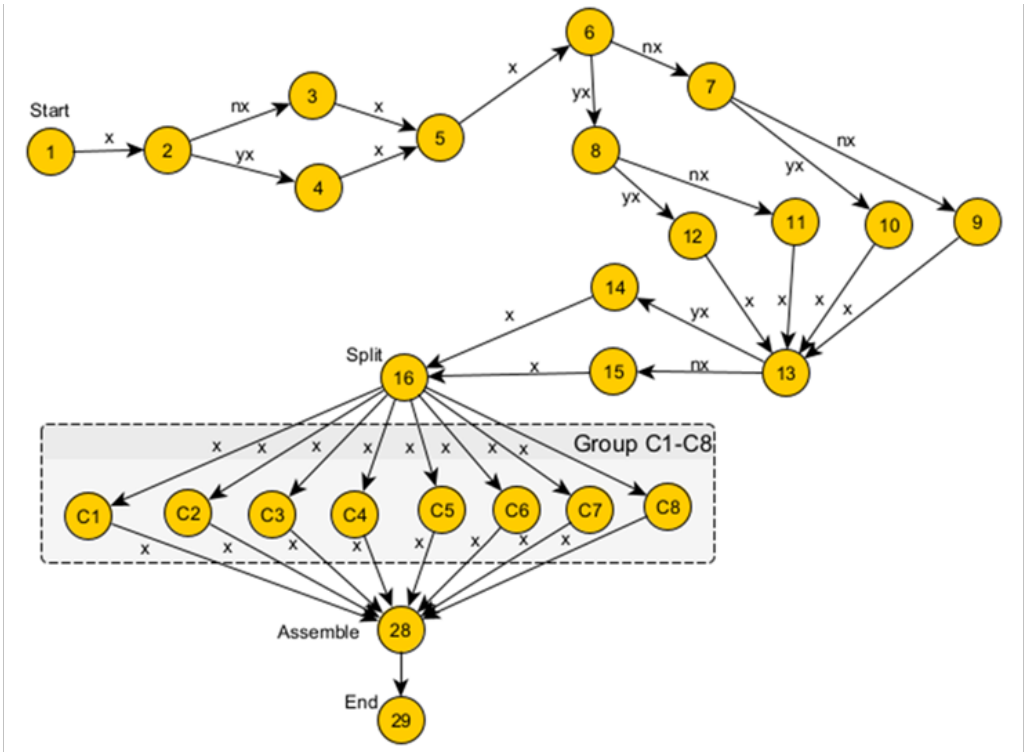


Рисунок 3 – Последовательно-параллельная сеть автоматов с вложенными состояниями Group C1-C8 выполнения приложения в кластере в режиме обработки SPMD (Single Program, Multiple Data)

Рассмотрение примеров выполнения приложений в режиме *SPMD* при наличии последовательного и параллельных участков позволит проверить соответствие результатов статистического моделирования второму закону Амдала [18, 19].

Определим входные переменные в графах переходов состояний частичных автоматов Мура на рисунках 2 и 3, следующим образом: всегда $x = \textbf{\textit{true}}$ при передаче управления от программного модуля, не вычисляющего и не вводящего логическое условие, а значения входных переменных $nx = \neg X(A_i)$ и $yx = X(A_i)$ соответствуют номерам i состояний автомата. Здесь значение высказывания $X(A_i)$ определяется результатом выполнения программного модуля A_i.

При построении ЛАОВ формально не требуется предварительное построение логической сети Петри, поскольку сами ЛАОВ являются мощным средством представления сложных асинхронных дискретных систем, однако графика сетей Петри, равно как и графов переходов состояний частичных автоматов, облегчают построение выражений ЛАОВ. В качестве примеров составления трех начальных выражений ЛАОВ системы L_{Seq} выбраны состояния 1, 2, 3 и 4 (рис. 2).

Первое выражение описывает переход от состояния 1 к состоянию 2:

$T_{1,2}$: $[M(A_1)\& \neg M(A_2)](\{M(A_1) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$,

где M: $A \rightarrow \{\textbf{\textit{true}}, \textbf{\textit{false}}\}$ – унарный предикат, определяющий в терминах логических сетей Петри маркировку некоторой позиции из множества A; « ← » – символ операции модификации предиката; в квадратные скобки заключено выражение для составного высказывания; в фигурных скобках заключена последовательность действий по модификации предикатов. Таким образом выражением $T_{1,2}$ описывается переход метки из позиции A_1 в позицию A_2 логической сети Петри. Программной переинтерпретации данного выражения соответствуют следующие действия: «по завершении выполнения программного модуля A_1 управление и результаты передаются модулю A_2». Оператор *Ret* выполняет переход к началу системы ЛАОВ при ложности составного высказывания в квадратных скобках.

Выражениям $T_{2,3}$ и $T_{2,4}$ соответствуют переходы по условию, то есть по значению высказывания $X(A_2)$:

$T_{2,3}$: $[M(A_2) \& \neg M(A_3) \& \neg X(A_2)](\{X(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_3) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{2,4}$: $[M(A_2) \& \neg M(A_4) \& X(A_2)](\{X(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_4) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$,

где X: $A \rightarrow \{\textbf{\textit{true}}, \textbf{\textit{false}}, \textbf{\textit{undef}}\}$ – унарный предикат, значение которого $X(A_i)$ при фиксированной предметной переменной A определяется результатом выполнения соответствующего программного модуля A_i; после проведенной проверки и переходе значение условия $X(A_i)$ становится неопределенным до очередного вычисления или ввода извне.

Полная система L_{Seq} логико-алгебраических операционных выражений для последовательного участка программы составлена в соответствии с верхней частью рисунка 2 и имеет следующий вид:

$T_{1,2}$: $[M(A_1)\&\neg M(A_2)](\{M(A_1) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{2,3}$: $[M(A_2) \& \neg M(A_3) \& \neg X(A_2)](\{X(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_3) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{2,4}$: $[M(A_2) \& \neg M(A_4) \& X(A_2)](\{X(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_2) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_4) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{3,5}$: $[M(A_3)\&\neg M(A_5)](\{M(A_3) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_5) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{4,5}$: $[M(A_4)\&\neg M(A_5)](\{M(A_4) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_5) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{5,6}$: $[M(A_5)\&\neg M(A_6)](\{M(A_5) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_6) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{6,7}$: $[M(A_6) \& \neg M(A_7) \& \neg X(A_6)](\{X(A_6) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_6) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_7) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{6,8}$: $[M(A_6) \& \neg M(A_8) \& X(A_6)](\{X(A_6) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_6) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_8) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{7,9}$: $[M(A_7) \& \neg M(A_9) \& \neg X(A_7)](\{X(A_7) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_7) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_9) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{7,10}$: $[M(A_7) \& \neg M(A_{10}) \& X(A_7)](\{X(A_7) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_7) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{10}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{8,11}$: $[M(A_8) \& \neg M(A_{11}) \& \neg X(A_8)](\{X(A_8) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_8) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{11}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{8,12}$: $[M(A_8) \& \neg M(A_{12}) \& X(A_8)](\{X(A_8) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_8) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{12}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{9,13}$: $[M(A_9) \&\neg M(A_{13})](\{M(A_9) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{10,13}$: $[M(A_{10}) \&\neg M(A_{13})](\{M(A_{10}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{11,13}$: $[M(A_{11}) \&\neg M(A_{13})](\{M(A_{11}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{12,13}$: $[M(A_{12}) \&\neg M(A_{13})](\{M(A_{12}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret)$;

$T_{13,14}$: $[M(A_{13}) \& \neg M(A_{14}) \& X(A_{13})](\{X(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$

$M(A_{14}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{13,15}$: $[M(A_{13}) \,\&\, \neg\, M(A_{15}) \,\&\, \neg\, X(A_{13})](\{X(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{13}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{15}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{14,16}$: $[M(A_{14}) \,\&\, \neg\, M(A_{16})](\{M(A_{14}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{16}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{15,16}$: $[M(A_{15}) \,\&\, \neg\, M(A_{16})](\{M(A_{15}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{16}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,17}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{17})](\{M(A_{16}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$).

Система логико-алгебраических операционных выражений для распараллеленных участков кластерного приложения. Система ЛАОВ для одной реплики C_0 для спецификации копий параллельных программ имеет следующий вид (выражения составлены в соответствии с графом, размещенном в затемненной области C_0 на рисунке 2):

$T_{17,18}$: $[M(A_{17}) \,\&\, \neg\, M(A_{18}) \,\&\, X(A_{17})](\{X(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{17,21}$: $[M(A_{17}) \,\&\, \neg\, M(A_{21}) \,\&\, \neg\, X(A_{17})](\{X(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{21}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{21}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{18,19}$: $[M(A_{18}) \,\&\, \neg\, M(A_{19}) \,\&\, X(A_{18})](\{X(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{18,22}$: $[M(A_{18}) \,\&\, \neg\, M(A_{22}) \,\&\, \neg\, X(A_{17})](\{X(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{19,20}$: $[M(A_{19}) \,\&\, \neg\, M(A_{20}) \,\&\, X(A_{19})](\{X(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{20}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{19,24}$: $[M(A_{19}) \,\&\, \neg\, M(A_{24}) \,\&\, \neg\, X(A_{19})](\{X(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{20,18}$: $[M(A_{20}) \,\&\, \neg\, M(A_{18})](\{M(A_{20}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{21,24}$: $[M(A_{21}) \,\&\, \neg\, M(A_{24})](\{M(A_{21}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{22,23}$: $[M(A_{22}) \,\&\, \neg\, M(A_{23}) \,\&\, \neg\, X(A_{22})](\{X(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{23}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{22,24}$: $[M(A_{22}) \,\&\, \neg\, M(A_{24}) \,\&\, X(A_{22})](\{X(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{23,18}$: $[M(A_{23}) \,\&\, \neg\, M(A_{18})](\{M(A_{23}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{24,25}$: $[M(A_{24}) \,\&\, \neg\, M(A_{25}) \,\&\, \neg\, X(A_{24})](\{X(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{25}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{24,26}$: $[M(A_{22}) \,\&\, \neg\, M(A_{26}) \,\&\, X(A_{24})](\{X(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{26}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{25,27}$: $[M(A_{25}) \,\&\, \neg\, M(A_{27})](\{M(A_{25}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{27}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{26,27}$: $[M(A_{26}) \,\&\, \neg\, M(A_{27})](\{M(A_{26}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{27}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{27,28}$: $[M(A_{27}) \,\&\, \neg\, M(A_{28})](\{M(A_{27}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{28}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);

Для получения логико-алгебраических операционных выражений для программы вида *SPMD* с параллельными участками (рис. 3) выражение для перехода

$T_{16,17}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{17})](\{M(A_{16}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$)

в системе L_{Seq} необходимо заменить на восемь следующих выражений:

$T_{16,C1}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C1})](\{M(A_{C1}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C2}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C2})](\{M(A_{C2}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C3}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C3})](\{M(A_{C3}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C4}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C4})](\{M(A_{C4}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C5}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C5})](\{M(A_{C5}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C6}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C6})](\{M(A_{C6}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C7}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C7})](\{M(A_{C7}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{16,C8}$: $[M(A_{16}) \,\&\, \neg\, M(A_{C8})](\{M(A_{C8}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$).

Следующая система ЛАОВ описывает реплицируемый (клонируемый) участок программы:

ParReplicate$(i = 1..8)C_i$:
$\{\{T_{17,18}$: $[M(A_{17}) \,\&\, \neg\, M(A_{18}) \,\&\, X(A_{17})](\{X(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{17,21}$: $[M(A_{17}) \,\&\, \neg\, M(A_{21}) \,\&\, \neg\, X(A_{17})](\{X(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{21}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$
$M(A_{21}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{18,19}$: $[M(A_{18}) \,\&\, \neg\, M(A_{19}) \,\&\, X(A_{18})](\{X(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}, M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{false}},$

$M(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{18,22}$: [$M(A_{18})$ & ¬ $M(A_{22})$ & ¬ $X(A_{17})$]({$X(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{19,20}$: [$M(A_{19})$ & ¬ $M(A_{20})$ & $X(A_{19})$]({$X(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{20}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{19,24}$: [$M(A_{19})$ & ¬ $M(A_{24})$ & ¬ $X(A_{19})$]({$X(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{19}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{20,18}$: [$M(A_{20})$ & ¬ $M(A_{18})$]({$M(A_{20}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{21,24}$: [$M(A_{21})$ & ¬ $M(A_{24})$]({$M(A_{21}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{22,23}$: [$M(A_{22})$ & ¬ $M(A_{23})$ & ¬ $X(A_{22})$]({$X(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{23}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{22,24}$: [$M(A_{22})$ & ¬ $M(A_{24})$ & $X(A_{22})$]({$X(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{22}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{23,18}$: [$M(A_{23})$ & ¬ $M(A_{18})$]({$M(A_{23}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{18}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{24,25}$: [$M(A_{24})$ & ¬ $M(A_{25})$ & ¬ $X(A_{24})$]({$X(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{25}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{24,26}$: [$M(A_{22})$ & ¬ $M(A_{26})$ & $X(A_{24})$]({$X(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{undef}}$, $M(A_{24}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{26}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{25,27}$: [$M(A_{25})$ & ¬ $M(A_{27})$]({$M(A_{25}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{27}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{26,27}$: [$M(A_{26})$ & ¬ $M(A_{27})$]({$M(A_{26}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{27}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{27,28}$: [$M(A_{27})$ & ¬ $M(A_{28})$]({$M(A_{27}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{28}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$)}},

Затем необходимо завершить описание восьми реплик следующими выражениями:
T_{28}: [$M(A_{C1})$ & $M(A_{C2})$ & $M(A_{C3})$ & $M(A_{C4})$ & $M(A_{C5})$ & $M(A_{C6})$ &
$M(A_{C7})$ & $M(A_{C8})$ & ¬ $M(A_{28})$]({$M(A_{C1}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{C2}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{C3}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{C4}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{C5}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{C6}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$M(A_{C7}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{C8}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{28}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$);
$T_{28,29}$: [$M(A_{28})$ & ¬ $M(A_{29})$]({$M(A_{28}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$, $M(A_{29}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$).

Выражением T_{28} описывается процесс сборки результатов выполнения всех восьми реплик ***ParReplicate***(i = 1..8)C_i, выполняемых параллельно. Выражением $T_{28,29}$ текст модели завершается.

Полная модель с одним последовательным участком и восемью параллельно выполняемыми независимо друг от друга участками может быть описана выражением L_{Seq} ***ParReplicate***(i = 1..8)C_i.

Организация работы и моделирование вычислительного кластера в режиме MPMD «Множество программ, множество потоков данных». Запуск вычислительного кластера в режиме *MPMD* (*Multiple Programs, Multiple Data*) соответствует случаю, когда на разных узлах кластера в локальной сети выполняются разные программы, реализующие модули одного и того же распределенного алгоритма. В процессе реализации сетевого алгоритма модули передают друг другу управление и, при необходимости, промежуточные результаты. При описании исполнимой имитационной модели далее будет использовано (там, где это не вызовет противоречий) отождествление объектов модели и объектов моделируемой системы, что упростит описание и сделает его более компактным.

Логико-алгебраическая операционная модель, очевидно, может быть построена при использовании графа переходов состояний, изображенного на рисунке 4, для чего необходимо соблюдать правило формирования условий операторами, в том числе операторами ввода условий.

Введен следующий унарный предикат развертывания распределенного приложения:

D: $Modules \times Nodes \rightarrow \{\textbf{\textit{true}}, \textbf{\textit{false}}\}$,

где $Modules = \{A_1, A_2, \ldots, A_{28}\}$ – множество модулей распределенного приложения; $Nodes = \{N_0, N_1, \ldots, N_{12}\}$ – множество узлов кластера, где N_0 – управляющий узел кластера, на котором размещены управляющие модули A_1, A_2, …, A_{16}. Связь с распределенным приложением, размещенным на узлах N_1, N_2, …, N_{12}, осуществляется модулем A_{16} с узла N_0. Одноименное предикату D отношение (область его истинности) носит функциональный характер, так как каждый модуль распределенного приложения может быть размещен только на одном узле кластера.

Поскольку управляющие модули A_1, A_2, …, A_{16} размещены на одном и том же узле, модели их функционирования соответствует составленная ранее система логико-алгебраических операционных выражений L_{Seq}, в которой выражение $T_{16,17}$ необходимо заменить следующим выражением $Q_{16,17}$ для переходного модуля A_{16}, реализующего инициирование распределенного *MPMD*-приложения:

$Q_{16,17}$: [$M(A_{16})$]([$S(N_0, N_1)$* & $R(N_1, N_0)$* & ¬ $M(A_{17})$]({$M(A_{16}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$S(N_0, N_1) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$*, $R(N_1, N_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$*, $M(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Ret$) $\vee$ Ret).

Данное выражение составлено в соответствии с алгеброй алгоритмов [10, 11] и содержит суперпозицию двух операций α-дизъюнкций. Проверяемые условия заключены в квадратные скобки.

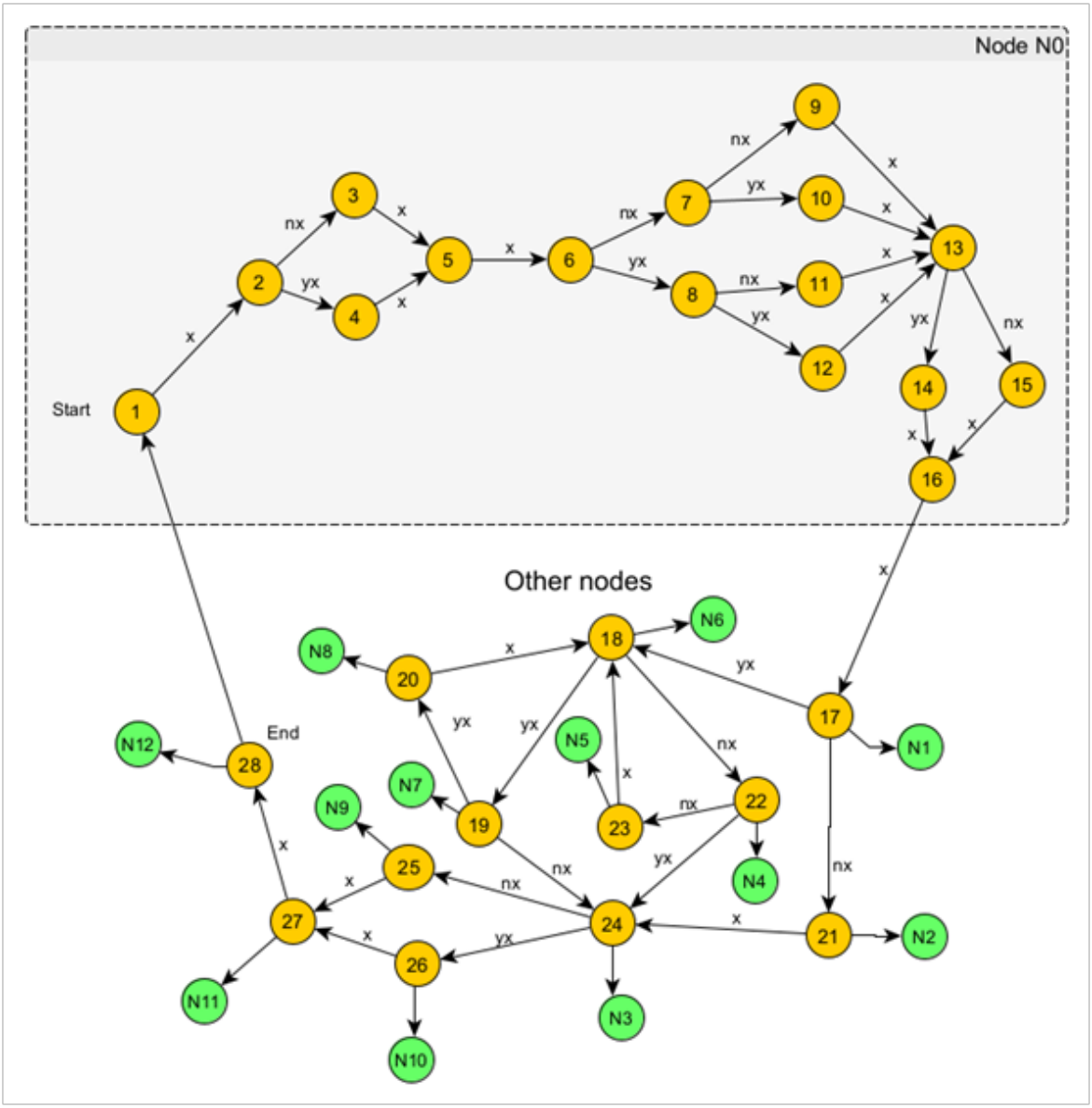


Рисунок 4 – Граф переходов состояний вычислительного кластера, соответствующий работе рас-пределенного многомодульного приложения в режиме MPMD (Multiple Programs, Multiple Data) на нижней части рисунка; верхняя часть соответствует последовательному подготовительному этапу

Операционная часть ЛАОВ заключена в фигурные скобки, а расстановка круглых скобок определяет порядок выполнения операций проверки α-условий и модификации унарных предикатов. Операции, заключенные в квадратные и в фигурные скобки, выполняются последовательно. Модули одного и того же приложения могут выполняться параллельно только в том случае, когда проверки условий и модификации предикатов не зависят друг от друга.

При выполнении модуля $Q_{16,17}$ сначала проверяется высказывание $M(A_{16})$, истинность которого означает, что по завершении выполнения модуля A_{16} должен начать выполнение следующий модуль A_{17}. Здесь

M: *Modules* → {***true***, ***false***}

– унарный предикат, отмечающий выполнение одного из модулей множества *Modules*; истинность высказывания $M(A_i)$ означает, что модуль $A_i \in$ *Modules* выполняет свою часть распределенного приложения. Инициатором смены состояний данных модулей должен быть переходной модуль $Q_{16,17}$. В модели с высоким уровнем абстракции можно было бы ограничиться следующим выражением для переходного модуля:

$Q'_{16,17}$: $[M(A_{16})](\{M(A_{16}) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, M(A_{17}) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee E)$,

где E – пустое событие, которое не влияет на смену состояния. Затем переход (в модели – переходный модуль $Q'_{16,17}$) задерживает метку на время ее передачи из входной позиции в выходную. В данном случае следует указать на некоторую аналогию модели ЛАОВ другому известному формализму временных автоматных сетей Петри, отличающемуся особенностью интерпретации. Сеть Петри – это модель, отображающая статику и динамику асинхронных взаимодействий процессов [20, 21]. В связи с тем, что для первоначального

описания распределенного приложения была предложена автоматная модель (рис. 2), дальнейший интерес представляют автоматные *SM*-сети Петри (англ. *State Machine*). Каждый переход таких сетей имеет не более одного входа и не более одного выхода, а сами сети представляют собой модели процессов с переходами по условиям. Если в сети такого вида перемещается только одна метка, то сеть является графом переходов состояний автомата [16, 17]. Временные сети Петри (англ. *Timed Petri Nets*) позволяют моделировать дискретно-событийные системы с учетом задержек и временных ограничений.

Пример сети Петри, построенной по автоматной модели на рисунке 4, представлен на рисунке 5.

Для построения логико-вероятностной модели функционирования вычислительного кластера по построенной логико-алгебраической операционной модели возможно использовать понятие временных сетей Петри в следующей интерпретации: метка, попавшая в очередную позицию, задерживается на некоторое время, заданное вероятностным распределением или фрагментом реализованной программы распределенного приложения. Затем переход (в модели – переходный модуль) задерживает метку на время ее передачи из входной позиции в выходную.

При реализации модели в качестве элемента функциональной архитектуры кластера временные задержки формируются естественным образом, например, в процессе передачи управляющих сообщений. Этим и обусловлено различие выражений $Q_{16,17}$ и $Q'_{16,17}$ для переходного модуля.

Выражение для переходного модуля $Q_{16,17}$ (размещенного на узле N_0 кластера) соответствует варианту логико-алгебраической модели, дополненной учетом важных свойств и управляющих команд локальной вычислительной сети, на которой реализован вычислительный кластер. В этом выражении, после описанной ранее проверки высказывания $M(A_{16})$ на истинность, проверяется истинность сложного составного высказывания

$[S(N_0, N_1)^* \,\&\, R(N_1, N_0)^* \,\&\, \neg\, M(A_{17})]$,

состоящего из трех высказываний, где отмеченные звездочками высказывания используются в следующей новой интерпретации. Здесь S и R – бинарные предикаты, моделирующие передачу (S) и прием (R) служебных сообщений:

S: *N*ode*s* × *N*ode*s* → {***true***, ***false***};

R: *N*ode*s* × *N*ode*s* → {***true***, ***false***}.

Истинность высказывания $S(N_0, N_1)^*$ соответствует передаче «запрашивающего» сообщения из узла N_0 в узел N_1, а истинность высказывания $R(N_1, N_0)^*$ соответствует передаче «ответного» сообщения из N_1, в узел N_0. Передается информация о готовности адресуемого модуля A_{17} к приему сообщения, то есть (в модели) это информация о том, истинно ли высказывание $\neg\, M(A_{17})$. Если оно истинно при ложном высказывании $M(A_{17})$, то это означает, что модуль A_{17} не задействован ($M(A_{17}) =$ ***false***) и готов к принятию управления от модуля A_{16}.

При соблюдении всех описанных условий устанавливается истинность составного высказывания. Звездочки, которыми отмечены высказывания $S(N_0, N_1)^*$ и $R(N_1, N_0)^*$, означает, что по завершении передач сообщений истинность этих высказываний по умолчанию меняется на ложность, которая сохраняется до повторного инициирования переходного модуля $Q_{16,17}$.

После установления истинности высказываний $M(A_{16})$ и $\neg\, M(A_{17})$ выполняются действия, предписанные выражением в фигурных скобках:

$\{M(A_{16}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_0, N_1) \leftarrow$ ***true****, $R(N_1, N_0) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{17}) \leftarrow$ ***true***$\}$.

Данное выражение включает операции модификации предикатов M, S и R. Операция $M(A_{16}) \leftarrow$ ***false*** означает, что модуль A_{16} прекращает свою работу в связи с передачей управления и данных модулю A_{17}. Операция $S(N_0, N_1) \leftarrow$ ***true**** означает, что узел N_0 должен передать управление узлу N_1 кластера. Операция $R(N_1, N_0) \leftarrow$ ***true**** означает, что узел N_1 должен ответить узлу N_0, сообщая ему о готовности принять управление. Звездочки, которыми отмечены обе операции, означают, что высказываниям сразу после передачи сообщений будут присвоены ложные значения. Наконец, выполнение операции $M(A_{17}) \leftarrow$ ***true*** соответствует приему управления и данных модулем A_{17}.

При невыполнении хотя бы одного из описанных в квадратных скобках условий действия в фигурных скобках не выполняются, и в этом случае выполняется один из альтернативных для α-дизъюнкций операторов *Ret*. При помощи этого оператора после истечения заданного по умолчанию тайм-аута управление возвращается к повторному выполнению переходного модуля $Q_{16,17}$. Если указанная ситуация повторяется заранее предопределенное число раз, то в кластере регистрируется ошибочная или аварийная ситуация.

Система NETWORK-MPMD логико-алгебраических операционных выражений для MPMD-приложения содержит формализованные сетевые спецификации и имеет следующий вид:

$T_{17,18} / N_1$: $[M(A_{17}) \,\&\, X(A_{17})]$ $([S(N_1, N_6)^* \,\&\, R(N_6, N_1)^* \,\&$
$\neg\, M(A_{18}/N_6)](\{X(A_{17}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{17}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_1, N_6) \leftarrow$ ***true****,
$R(N_6, N_1) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{18}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{17,21} / N_1$: $[M(A_{17}) \,\&\, \neg\, X(A_{17})]([S(N_1, N_2)^* \,\&\, R(N_2, N_1)^* \,\&\, \neg\, M(A_{21})]$
$(\{X(A_{17}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{21}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_1, N_2) \leftarrow$ ***true****,

$R(N_2, N_1) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{21}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{18,19} / N_6$: $[M(A_{18})$ & $X(A_{18})][[S(N_6, N_7)^*$ & $R(N_7, N_6)^*$ & $\neg M(A_{19})]$
$(\{X(A_{18}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{18}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_6, N_7) \leftarrow$ ***true****, $R(N_7, N_6) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{19}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{18,22} / N_6$: $[M(A_{18})$ & $\neg X(A_{18})][[S(N_6, N_4)^*$ & $R(N_4, N_6)^*$ & $\neg (A_{22})]$
$(\{X(A_{18}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{18}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_6, N_4) \leftarrow$ ***true****, $R(N_4, N_6) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{22}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{19,20} / N_7$: $[M(A_{19})$ & $X(A_{19})][[S(N_7, N_8)^*$ & $R(N_8, N_7)^*$ & $\neg M(A_{20})]$
$(\{X(A_{19}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{19}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_7, N_8) \leftarrow$ ***true****, $R(N_8, N_7) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{20}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{19,24} / N_7$: $[M(A_{19})$ & $\neg X(A_{19})][[S(N_7, N_3)^*$ & $R(N_3, N_7)^*$ & $\neg (A_{24})]$
$(\{X(A_{19}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{19}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_7, N_3) \leftarrow$ ***true****, $R(N_7, N_3) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{24}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);
$T_{20,18} / N_8$: $[M(A_{20})][[S(N_8, N_6)^*$ & $R(N_6, N_8)^*$ & $\neg M(A_{18})][\{M(A_{20}) \leftarrow$ ***false***,
$S(N_8, N_6) \leftarrow$ ***true****, $R(N_6, N_8) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{18}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);
$T_{21,24} / N_2$: $[M(A_{21})][[S(N_2, N_3)^*$ & $R(N_3, N_2)^*$ & $\neg M(A_{24})][\{M(A_{21}) \leftarrow$ ***false***,
$S(N_2, N_3) \leftarrow$ ***true****, $R(N_3, N_2) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{24}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{22,23} / N_4$: $[M(A_{22})$ & $\neg X(A_{22})][[S(N_4, N_5)^*$ & $R(N_5, N_4)^*$ & $\neg (A_{23})]$
$(\{X(A_{22}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{22}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_4, N_5) \leftarrow$ ***true****, $R(N_5, N_4) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{23}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{22,24} / N_4$: $[M(A_{22})$ & $X(A_{22})][[S(N_4, N_3)^*$ & $R(N_3, N_4)^*$ & $\neg M(A_{24})]$
$(\{X(A_{22}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{22}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_4, N_3) \leftarrow$ ***true****, $R(N_3, N_4) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{24}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{23,18} / N_5$: $[M(A_{23})][[S(N_5, N_6)^*$ & $R(N_6, N_5)^*$ & $\neg M(A_{18})][\{M(A_{23}) \leftarrow$ ***false***,
$S(N_5, N_6) \leftarrow$ ***true****, $R(N_6, N_5) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{18}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{24,25} / N_3$: $[M(A_{24})$ & $\neg X(A_{24})][[S(N_3, N_9)^*$ & $R(N_9, N_3)^*$ & $\neg M(A_{25})]$
$(\{X(A_{24}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{24}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_3, N_9) \leftarrow$ ***true****, $R(N_9, N_3) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{25}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{24,26} / N_3$: $[M(A_{22})$ & $X(A_{24})][[S(N_3, N_{10})^*$ & $R(N_{10}, N_3)^*$ & $\neg (A_{26})]$
$(\{X(A_{24}) \leftarrow$ ***undef***, $M(A_{24}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_3, N_{10}) \leftarrow$ ***true****,
$R(N_{10}, N_3) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{26}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{25,27} / N_9$: $[M(A_{25})][[S(N_9, N_{11})^*$ & $R(N_{11}, N_9)^*$ & $\neg M(A_{27})]$
$(\{M(A_{25}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_9, N_{11}) \leftarrow$ ***true****, $R(N_{11}, N_9) \leftarrow$ ***true****, $M(A_{27}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee$
$Ret) \vee Ret$);

$T_{26,27} / N_{10}$: $[M(A_{26})][[S(N_{10}, N_{11})^*$ & $R(N_{11}, N_{10})^*$ & $\neg M(A_{27})]$
$(\{M(A_{26}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_{10}, N_{11}) \leftarrow$ ***true****, $R(N_{11}, N_{10}) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{27}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{27,28} / N_{11}$: $[M(A_{27})][[S(N_{11}, N_{12})^*$ & $R(N_{12}, N_{11})^*$ & $\neg M(A_{28})]$
$(\{M(A_{27}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_{11}, N_{12}) \leftarrow$ ***true****, $R(N_{12}, N_{11}) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{28}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$);

$T_{28,1} / N_{12}$: $[M(A_{27})][[S(N_{12}, N_0)^*$ & $R(N_0, N_{12})^*$ & $\neg M(A_{28})]$
$(\{M(A_{27}) \leftarrow$ ***false***, $S(N_{12}, N_0) \leftarrow$ ***true****, $R(N_0, N_{12}) \leftarrow$ ***true****,
$M(A_{28}) \leftarrow$ ***true***$\} \vee Ret) \vee Ret$).

Система логико-алгебраических операционных выражений *NETWORK-MPMD* положена в основу реально работающего приложения для вычислительного кластера, а также для исполнимой статистической модели.

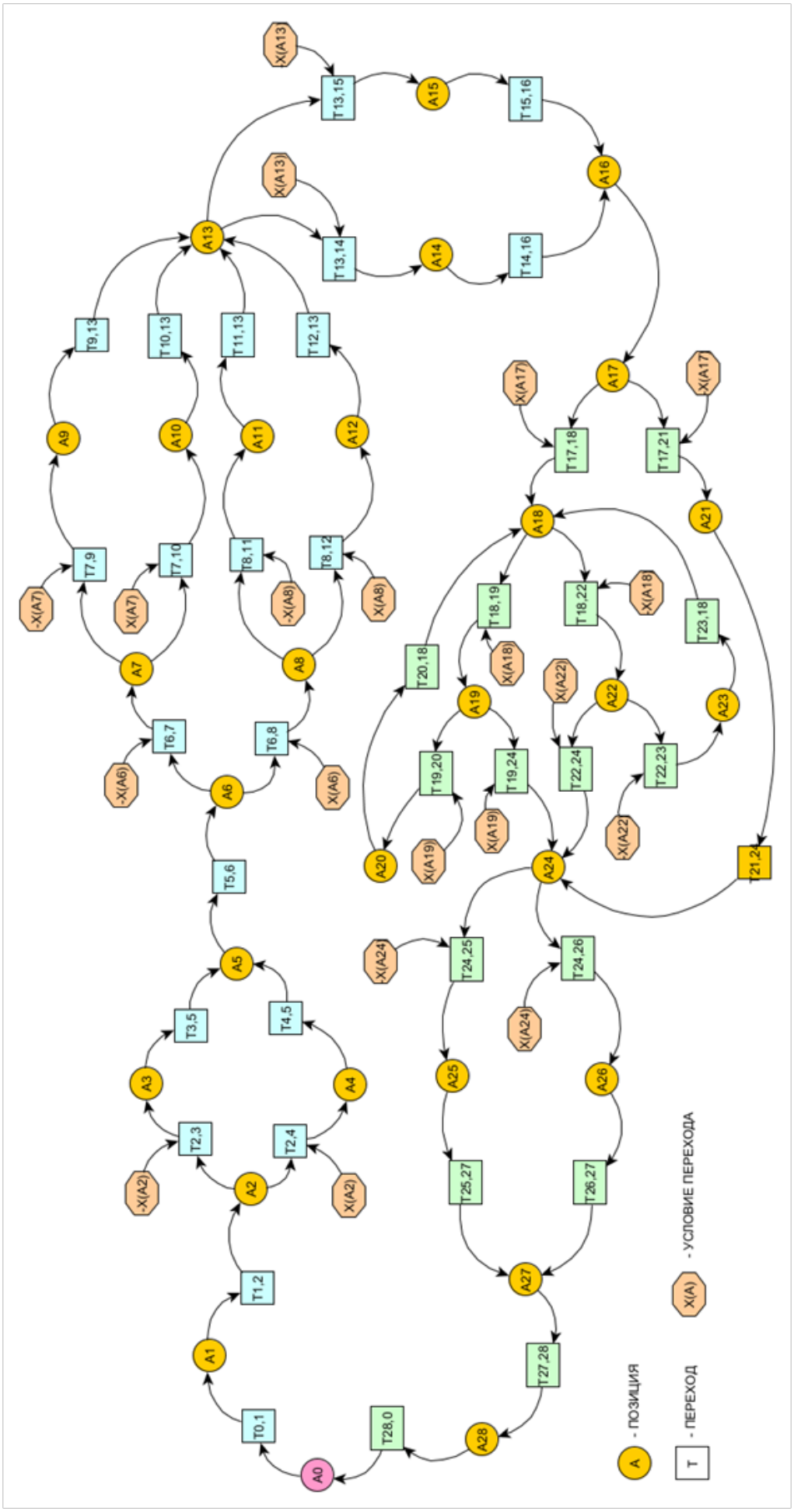


*Рисунок 5 – Логическая (бинарная) сеть Петри, использованная при составлении систем логико-алгебраических уравнений L_{Seq}*L_{Clon} и NETWORK-MPMD описывающих функционирование вычислительного кластера*

Результаты. *MPMD*-режим работы кластера относится к числу самых сложных для реализации в кластере вычислительных машин. Система *NETWORK-MPMD* логико-алгебраических операционных выражений для MPMD-приложения содержит формализованные сетевые спецификации и составлена на основе графа переходов состояний вычислительного кластера (рис. 4), на котором выполняется сложное распределенное многомодульное приложение. Производительность кластера можно повысить, если загружать новые сетевые программы и выполнять их в конвейерном *MPMD*-режиме *NETWORK-MPMD*. Реализованная на основе ЛАОВ логико-вероятностная модель *NETWORK-MPMD* позволяет моделировать исполнение сразу нескольких приложений, запускаемых последовательно с интервалом *T*. Работа каждого из запускаемых последовательно приложений соответствует графу переходов состояний на нижней части рисунка 4 и системе выражений *NETWORK-MPMD*. Каждому оператору в модели требуется время выполнения, распределенное равномерно от 2 мс до 10 мс. Сообщения содержат около 1 Мбит информации. При работе для каждого оператора задан свой узел. Такая организация работы кластера необходима в том случае, когда данные находятся на различных узлах, и на узлы загружаются различные модули, связанные по управлению и данным. Отличительной особенностью модели является возможность учета произвольного алгоритма работы моделируемого приложения.

Главной целью экспериментов являлось определение границ пропускной способности кластера при типовой нагрузке. При уменьшении интервала времени *T* между последовательными запусками приложений до 7 мс кластерная система входит в нестационарный режим работы. С ростом объема выборки время выполнения увеличивается вплоть до прекращения работы моделирующей программы. Для входа в нестационарный режим достаточно, чтобы хотя бы загрузка одного из узлов достигнет почти 100% (узел *N*_1 – 99,9%; узел *N*_6 – 97,1; узел *N*_3 – 99,2%; узел *N*_11 – 98,1%). На наличие нестационарного режима указывает характер изменения гистограммы распределения времени обработки серии сетевых программ и резкое возрастание среднего времени (*MEAN* = 701,6), которое при увеличении объема выборки тоже резко возрастает, что является одним из признаков нестационарности процесса.

Таким образом, предельное значение интервала времени *T* между последовательными запусками приложения в кластер, как видно по результатам моделирования, не должно быть меньшим, чем 7,5 мс, то есть интенсивность инициализаций λ не должна превышать 133,3 1/с. Результаты моделирования показали, что при $T \geq 50$ мс приложения не оказывают влияния друг на друга ($\lambda \leq 20$ 1/с).

Обсуждение. Обобщенные результаты статистических экспериментов с моделью *NETWORK-MPMD* параллельно-конвейерного выполнения приложения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Обобщенные результаты статистических экспериментов с моделью NETWORK-MPMD

T (мс)	λ (1/с)	$T_{Ср.}$ (мс)	K_F	$K_{Зам.}$
50	20	49,4	1	1
20	50	51,1	1,07	1,03
10	100	63,7	1,20	1,29
9	111,1	72,5	1,33	1,47
8	125	95,3	2,78	1,93
7,5	133,3	134,7	6,66	2,72

Здесь *T* – интервал между последовательными моментами запуска однотипных (но с разными данными) независимых по управлению и данным сетевых кластерных приложений; управляющая системная программа отправляет очередное приложение на обработку в сеть в соответствии с графом переходов состояний на рисунке 4; λ – интенсивность инициализаций приложений; $T_{Ср.}$ – оценка математического ожидания времени выполнения одного приложения из нескольких, задействованных в параллельно-последовательном режиме; K_F – коэффициент, характеризующий относительный выигрыш по интенсивности запуска приложений при организации работы кластера в параллельно-конвейерном режиме – это в данном случае главный параметр, характеризующий эффективность использования вычислительного кластера; $K_{Зам.}$ – коэффициент, характеризующий замедление работы приложений при взаимном влиянии друг на друга при ожидании начала обработки в очередях к узлам.

Например, при значении $T = 8$ мс получена оценка среднего времени выполнения приложения $T_{Ср.} = 95{,}3$, значение $K_F = 125/20 = 2{,}78$ (то есть интенсивность λ потока запусков приложений увеличилась почти в 3 раза по сравнению с последовательной работой приложений, которая наблюдалась при $\lambda = 20$ 1/с); $K_{Зам.} = 95{,}3/49{,}4 = 1{,}93$ – это значение определяется «накладными расходами» на организацию очередей ожидания к узлам, на которых расположена то или иная часть приложения, реализующая соответствующий оператор распределенного приложения.

Разработанная методика создания исполнимых имитационных моделей кластерных вычислительных систем позволяет оценить основные временные характеристики и загрузку узлов, что особенно важно при использовании кластера при конвейерном запуске приложений. Отличительной особенностью разработанных моделей является то, что основой их построения является автоматная и логико-вероятностная модели выполнения кластерного приложения, которые легко модифицируются и после некоторых дополнений могут использоваться в качестве исполнимых формализованных спецификаций при создании реального

приложения.

Выводы. Методология, предложенная и использованные в настоящей работе, основана на концепции проектирования функциональной архитектуры, задаваемой логико-алгебраическими операционными исполнимыми моделями. Методика является разновидностью методики предметно-ориентированного проектирования и поддерживает проектирование, управляемое моделями программных систем.

Показано, что главным эффектом от интерпретации предлагаемых логико-алгебраических моделей является возможность их использования в качестве структурированных формализованных спецификаций при описании распараллеленных процессов в кластерных вычислительных системах на уровне задач, данных, алгоритмов и машинных инструкций.

Результаты проведенных статистических экспериментов показывают правильность построения логико-алгебраических моделей и логико-вероятностных моделей, так и формализованных спецификаций.

Серия проведенных статистических экспериментов показала, что при работе в режиме параллельно-конвейерного запуска программ на исполнение на узлах кластерной вычислительной системы может быть получен заметный выигрыш в производительности при контроле за соблюдением стационарного режима работы модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кластер (группа компьютеров). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кластер_(группа_компьютеров) (доступ свободный, дата обращения 02.06.2025).

2. Куликов Г.Г., Антонов В.В., Конев К.А. Кластерное программное обеспечение автоматизированной информационной информационной системы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 19-28.

3. Разница между грид-вычислениями и кластерными вычислениями. URL: https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-grid-computing-and-cluster-computing/ (доступ свободный, дата обращения 02.06.2025).

4. Высокоскоростная сеть Ангара. URL: http://www.nicevt.ru/vysokoskorostnaya-set-angara/ (доступ свободный, дата обращения 02.06.2025).

5. Ангара (интерконнект). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ангара_(интерконнект) (доступ свободный, дата обращения 02.06.2025).

6. Kahanwal B., Singh T.P. The Distributed Computing Paradigms: P2P, Grid, Cluster, Cloud, and Jungle // International Journal of Latest Research in Science and Technology. ISSN (Online): 2278-5299. – Vol. 1. – Issue 2, 2012. – P. 183-187.

7. Kumar R. Comparison between Cloud Computing, Grid Computing, Cluster Computing and Virtualization // International Journal of Modern Computer Science and Applications (IJMCSA). – Vol. 3. – Issue No.1, January, 2015. – P. 42-47.

8. Sadashiv N., Kumar S.M.D. Cluster, Grid and Cloud Computing: A Detailed Comparison // The 6th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2011), August 3-5, 2011. SuperStar Virgo, Singapore. 2011. – P. 477-482.

9. Kaur K., Rai A.K. A Comparative Analysis: Grid, Cluster and Cloud Computing // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – Vol. 3. – No. 3. – 2014. – P. 5730-5734.

10. Алгеброалгоритмические модели и методы параллельного программирования / Андон Ф.И., Дорошенко А.Е., Цейтлин Г.Е., Яценко Е.А. – Академпериодика, 2007. – 634 с.

11. Многоуровневое структурное проектирование программ. Теоретические основы, инструментарий/ Е.Л. Ющенко, Г.Е. Цейтлин, В.П. Грицай, Т.К. Терзян. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 208 с.

12. Iordache M.V., Antsaklis P.J. Supervisory Control of Concurrent Systems. A Petri Net Structural Approach. – Boston: Birkhauser, 2006. – 281 p.

13. Gurevich Y. Abstract State Machines: An Overview of the Project // Foundations of Information and Knowledge Systems. Lect. Notes Comput. Sci., vol. 2942, 2004. – P. 6-13.

14. Волчихин В.И., Зинкин С.А. Логико-алгебраические модели и методы в проектировании функциональной архитектуры распределенных систем хранения и обработки данных // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 2. – С. 3-16.

15. Зинкин С.А. Элементы новой объектно-ориентированной технологии для моделирования и реализации систем и сетей хранения и обработки данных // Информационные технологии. – 2008. – № 10. – С. 20-27.

16. Методы параллельного микропрограммирования / П.А. Анишев, С.М. Ачасова, О.Л. Бандман и др.; под ред. О.Л. Бандман. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1981. – 180 с.

17. Юдицкий С.А., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.

18. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.

19. Levis T.G. Foundation of parallel programming: machine-independent approach. IEEE Computer Society Press, 1994. – 282 p.

20. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. – 368 с.

21. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. – 263 с.

22. Ачасова С.М., Бандман О.Л. Корректность параллельных вычислительных процессов. Новосибирск: Наука, 1990. – 253 с.

23. Мараховский В.Б., Розенблюм Л.Я., Яковлев А.В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. Курс для системных архитекторов, программистов, системных аналитиков, проектировщиков сложных систем управления. Санкт-Петербург: Профессиональная литература, АйТи-Подготовка, 2014. – 400 с.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.896
EDN: UFKHRU

НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОТКРЫТЫХ СПУТНИКОВЫХ КАРТАХ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 3275-5116
AuthorID: 284873

ВАЛЬКО Александр Фёдорович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования»
Пензенский государственный университет
(440052, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail:aleksander.valk@rambler.ru)

SPIN: 9100-4239
AuthorID: 642493
ORCID: 0009-0006-1953-2914
ScopusID: 57223891825

БУРУКИНА Ирина Петровна, кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования»
Пензенский государственный университет
(440052, Россия, Пенза, улица Красная, 40, e-mail:burukinairina@gmail.com)

Аннотация. Статья посвящена разработке и исследованию инновационной навигационной системы, функционирующей на основе алгоритмов распознавания объектов в открытых спутниковых картах. Предлагается методика сопоставления реальных изображений окружающей среды, фиксируемых камерами летательного аппарата, с эталонными снимками из спутниковых карт. Система основана на применении сиамской нейронной сети совместно с сверточной нейронной сетью, производящих экстрагирование значимых признаков изображений и последующий сравнительный анализ их близости методом минимизации евклидового расстояния. Результаты сравнения позволяют оперативно определять положение движущегося объекта относительно заранее известного маршрута и выдавать точные команды коррекции траектории движения. Проведенные эксперименты подтверждают высокую точность предложенной технологии, ее применение способно повысить эффективность и безопасность автономных транспортных средств, используемых в различных сферах человеческой деятельности.

Ключевые слова: навигационная система, нейронные сети, открытые спутниковые карты, распознавание изображений, надежность, точность.

NAVIGATION SYSTEM BASED ON OBJECT RECOGNITION IN OPEN SATELLITE MAPS

© Author(s) 2025
VALKO Alexander Fedorovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Computer-aided Design Systems
Penza State University
(440052, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail:aleksander.valk@rambler.ru)

BURUKINA Irina Petrovna, candidate of technical sciences,
head of the Department of Computer-Aided Design Systems
Penza State University
(440052, Russia, Penza, Krasnaya Street, 40, e-mail:burukinairina@gmail.com)

Abstract. The article is devoted to the development and research of an innovative navigation system based on object recognition algorithms in open satellite maps. A method is proposed for comparing real images of the environment captured by aircraft cameras with reference images from satellite maps. The system is based on the use of the Siamese neural network in conjunction with a convolutional neural network, which extracts significant features of images and then comparatively analyzes their proximity using the Euclidean distance minimization method. The comparison results make it possible to quickly determine the position of a moving object relative to a pre-known route and issue accurate commands to correct the trajectory. The experiments carried out confirm the high *accuracy* of the proposed methodology. It is expected that the introduction of the presented technology will increase the efficiency and safety of autonomous vehicles used in various fields of human activity.

Keywords: navigation system, neural networks, open satellite maps, image recognition, reliability, *accuracy*

Для цитирования: *Валько А.Ф. Навигационная система на основе распознавания объектов в открытых спутниковых картах / А.Ф. Валько, И.П. Бурукина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 23-30. – EDN: UFKHRU.*

Введение. Традиционно применяемые навигационные системы, такие как глобальные системы позиционирования *GPS* (*global positioning system*), российская система ГЛОНАСС (глобальная навигационная спутниковая система) и триангуляция по базовым станциям сотовых сетей зарекомендовали себя как надежные инструменты для определения пространственного положения объектов. Их широкое распространение связано с удобством эксплуатации, низкими затратами на доступ к сервисам и высокой точностью измерений [1]. Тем не менее, данные методы имеют ряд существенных недостатков, среди которых наиболее значимыми являются ограниченность зон покрытия сигналов [2], низкая устойчивость к внешним воздействиям и помехам [3], а также повышенная чувствительность к условиям окружающей среды – плотной городской застройке, лесистой местности, использование во внутренних помещениях зданий и т.д. [4]. Отсутствие сигналов спутниковых навигационных систем может компенсироваться применением комбинации различных автономных и вспомогательных средств, позволяющих обеспечить надежное функционирование летательных аппаратов даже в сложных условиях [5]. Однако, и в этом случае возникает ряд проблем, связанных, как например в инерциальных навигационных системах, с накоплением ошибок (дрейфом) и необходимостью периодической коррекции [6].

Все вышеизложенное подчеркивает актуальность разработки новых подходов к повышению надежности пространственного позиционирования объектов. Одной из наиболее перспективных альтернатив являются методы, основанные на технологиях компьютерного зрения и глубокого обучения. Такие методы позволяют автоматически идентифицировать объекты окружающей среды, представленные на цифровых картах и спутниковых изображениях, обеспечивая возможность надежной ориентации даже в сложных ситуациях, связанных с отсутствием сигнала традиционных систем.

Методология. Целью исследования является повышение точности позиционирования объектов с помощью интеллектуальной навигационной системы, основанной на технологиях компьютерного зрения и углубленного анализа спутниковых изображений высокого разрешения. Основной компонент системы – нейросетевой алгоритм обработки картографических данных, обеспечивающий автоматическое распознавание наземных объектов по изображениям с камер беспилотных летательных аппаратов. Система предназначена для устойчивого функционирования летательных аппаратов в условиях отсутствия или ограниченной доступности спутниковых сигналов и недостаточной точности триангуляции по сетям мобильной инфраструктуры.

Задача исследования заключается в создании эффективной методики распознавания образов и определения координат идентифицированных объектов на цифровой карте путем сопоставления изображений, поступающих от камер беспилотного летательного аппарата, с соответствующими участками открытых электронных спутниковых карт. Задача реализуется в два этапа:

1) преобразование реальных сцен, регистрируемых камерами, в нормализированный формат, совместимый с масштабом и разрешением спутниковых карт для последующего сопоставления двух видов изображений;

2) создание алгоритма обработки изображений, основанного на принципах глубокого обучения нейронных сетей, обеспечивающего точную локализацию обнаруженных цифровыми камерами объектов и получение их достоверных пространственных координат.

Особое внимание в исследовании уделяется вопросам оптимизации стратегии архитектуры нейронной сети для максимального сохранения признаков, важных для правильной идентификации [7, 8].

Одним из важнейших преимуществ предлагаемого авторами подхода является применение готовых общедоступных цифровых карт высокого разрешения, представленных наиболее популярными онлайн сервисами (*yandex maps, google maps, 2gis*), что дает возможность эффективно взаимодействовать с большими объемами актуальной пространственно-географической информации. Использование высококачественных спутниковых снимков способствует созданию механизмов позиционирования и прокладки маршрута. Возможность масштабирования изображения до необходимого уровня детализации открывает новые перспективы для адаптации алгоритмов обнаружения и идентификации объектов различного масштаба, включая малые архитектурные формы, инженерные сооружения и природные образования.

Прототипом архитектуры нейронной сети для разрабатываемой системы служит сиамская нейронная сеть (рис. 1), предназначенная для сравнения входных пар и состоящая из двух подсетей с одинаковыми параметрами и весами [9]. Сиамская нейронная сеть включает две параллельные ветви, каждая из которых представлена отдельной глубокой нейронной сетью, осуществляющей независимую обработку отдельных образцов входных данных. Все обучаемые слои двух сетей совместно используют одни и те же параметры, обеспечивая однородность преобразования обоих входных сигналов. Затем представления, полученные каждой из ветвей сети, объединяются и передаются в выходную структуру, ответственную за вычисление значения контрастной потери. Данная потеря рассчитывается путем оценки разницы признаков между изображениями и оптимизацией общего набора весовых коэффициентов таким образом, чтобы уменьшить различие признаков для сходных пар объектов и увеличить – для несходных.

Реализацию подобного сценария авторы предлагают комбинировать с сверточными нейронными сетями *CNN* (*Convolutional Neural Networks*) для эффективной экстракции высокоуровневых

признаков из двумерных структурированных данных, таких как изображения. Применение *CNN* для решения задач компьютерного зрения [10] позволит обеспечить глубокий уровень абстрагирования с возможностью выделения уникальных особенностей объекта даже при вариативности условий съемки, освещенности и ракурса. Кроме этого, использование одной и той же структуры *CNN* в обеих ветвях сети снизит затраты на обучение и ускорит процесс тестирования, что значительно сократит объем необходимых ресурсов и ускорит процедуру оптимизации весов модели.

В качестве основы для сиамской нейронной сети выбрана предварительно обученная модель из семейства остаточных нейронных сетей *ResNet50* [11]. Учитывая специфику решаемой задачи, заключающейся в выявлении сходства между различными изображениями, исходная структура *ResNet50* была модифицирована путем исключения последнего полносвязного слоя, предназначенного для классификации изображений [12]. Архитектура усовершенствованной нейронной сети, ориентированной на решение поставленной в исследовании задачи, представлена на рисунке 2.

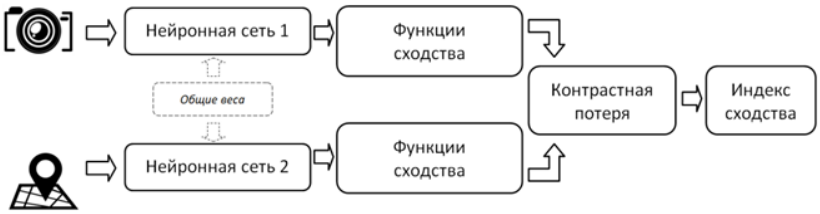


Рисунок 1 – Сиамская нейронная сеть

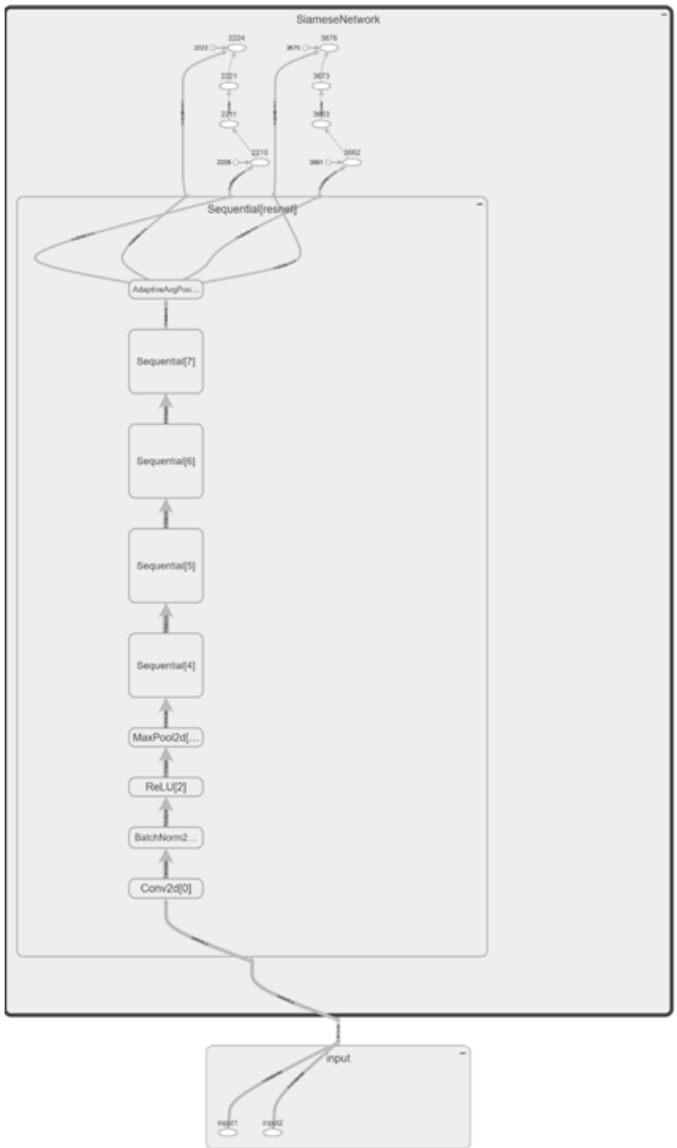


Рисунок 2 – Структура нейронной сети

Нейросеть содержит сверточные слои, сверточные блоки и остаточные блоки. Сверточные слои играют фундаментальную роль в извлечении признаков из изображений. Свертка включает применение фильтров (ядер) к входным изображениям. Это позволяет модели обнаруживать различные паттерны, такие как границы, текстуры и более сложные формы в данных. В нейросети, помимо самой операции свертки, эти слои сопровождаются нормализацией по батчам (*Batch Normalization*), которая стабилизирует процесс обучения, и функциями активации, такими как *ReLU* (*Rectified Linear Unit*), которые вводят нелинейность, позволяя модели изучать более сложные зависимости. Сверточные блоки являются строительными элементами сети и состоят из нескольких сверточных слоев, за которыми часто следуют нормализация по батчам и функции активации. Их основная цель – постепенно извлекать высокоуровневые признаки из входных данных. В контексте нейросети, эти «сверточные блоки» обычно интегрированы в более крупные структуры, такие как остаточные блоки, или являются частью начальных слоев перед остаточными блоками. Они эффективно уменьшают пространственную размерность изображения, одновременно увеличивая количество каналов (глубину), что позволяет захватывать все более сложные и абстрактные характеристики изображения. Остаточные блоки помогают решить критическую проблему исчезающего градиента во время обучения очень глубоких нейронных сетей, а также взрывающегося градиента. Благодаря этим связям информация более свободно распространяется по сети, что способствует плавному обучению и позволяет строить гораздо более глубокие модели без потери производительности или возникновения проблем сходимости. В представленной нейронной сети используются специфические «бутылочные» остаточные блоки, которые эффективно управляют количеством параметров, используя 1×1 свертки для уменьшения и последующего восстановления размерности каналов.

Результаты. Для наглядной демонстрации организации взаимосвязей и лучшего понимания структуры разработанной навигационной системы на рисунке 3 приведена диаграмма взаимодействия ее основных компонентов. Функция синтаксического анализа принимает на вход файл *KML* (*Keyhole Markup Language*), содержащий в себе геопространственную информацию [13]. В процессе работы этой функции содержимое файла анализируется и из него извлекаются географические координаты – значения широты и долготы точек заданного маршрута.

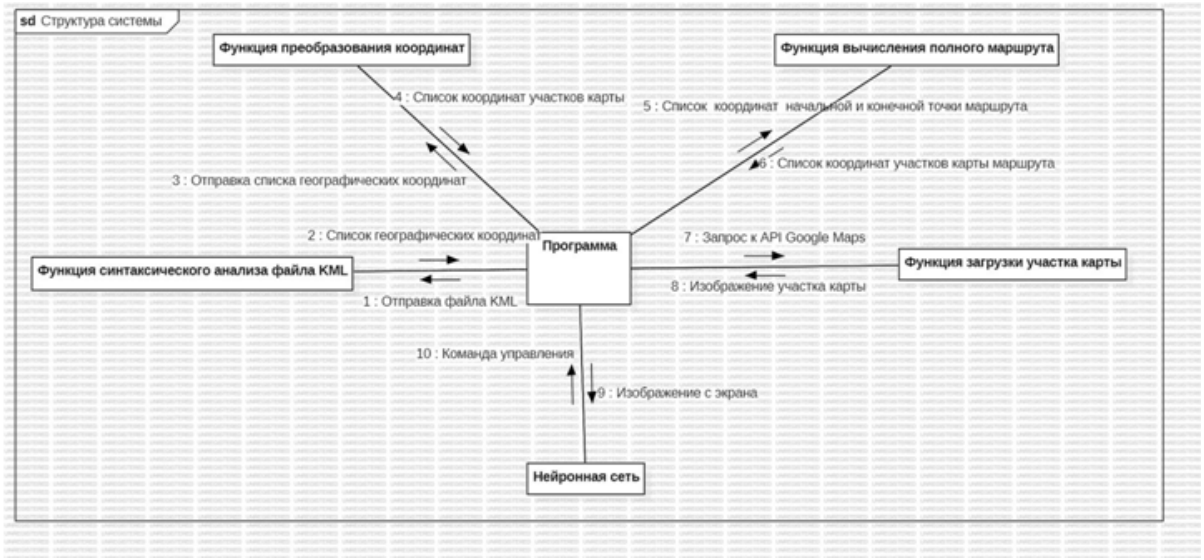


Рисунок 3 – Диаграмма взаимодействия навигационной системы

Далее функция преобразования координат принимает на вход список значений широты и долготы, полученных из функции анализа файла *KML*, после чего элементы списка посредством математических операций конвертируются в координаты тайлов – участков карты определенного масштаба размером 256×256 пикселей. Затем в функции вычисления полного маршрута с помощью преобразованных координат вычисляются координаты тайлов, лежащие между начальной и конечной точки маршрута, используя для этого алгоритм растеризации линии Брезенхема [14]. В процессе загрузки участка карты происходит запрос к *API* (*Application Programming Interface*) с размещенными открытыми цифровыми картами, в котором в качестве параметров указываются координаты по *x* и *y*, а также уровень масштабирования карты. Ответом на запрос является изображение участка карты в указанных координатах.

Основной задачей разрабатываемой системы является передача команд для управления объектом позиционирования в определенном перечне команд. Системой могут передаваться команды направления «север», «юг», «запад», «восток», «северо-запад», «северо-восток», «юго-запад», «юго-восток». Также система может оповестить о достижении объектом конечной точки маршрута, либо выдать сигнал об ошибке. Данная задача

решается усовершенствованной нейронной сетью (рис. 2). Входными данными служит изображение, поступающее с камеры летательного аппарата. Предварительная обработка осуществляется одновременно с загрузкой соответствующих картографических тайлов. Последовательно вводимое в нейросеть изображение с камеры и каждый из тайлов проходят процедуру извлечения векторов признаков (эмбеддингов). Эти векторы используются далее для расчета попарного евклидова расстояния. Значение данного расстояния определяет дальнейшую реакцию системы – если оно оказывается ниже заданного порогового уровня, то принимается решение о схожести сравниваемых изображений, в противном случае фиксируется их различие. Следующим этапом становится расчет направляющего вектора, соединяющего координату наиболее подходящего по признакам тайла с координатой ближайшего последующего тайла. Исходя из ориентации и величины указанного вектора, формируется управляющая команда, задающая направление движения объекта позиционирования.

Для обучения нейронной сети использованы изображения, в которых картографические объекты сняты с 200-3000 метров, чтобы объект позиционирования мог однозначно идентифицировать объекты при съемке. Усовершенствованная нейросеть обучена на наборе данных *EuroSAT*, который включает более 27000 спутниковых снимков различных картографических объектов [15]. Данные были распределены следующим образом: 80% изображений были добавлены в обучающий набор данных, 20% – в тестовый набор. Кроме этого, для качественного обучения модели была выбрана функция потерь, которая количественно оценивает разницу между предсказанными моделью значениями и фактическими значениями. В исследовании используется контрастивная (*Contrastive Loss*) функция потерь [16], научившая модель создавать такие низкоразмерные представления данных, в которых похожие объекты находятся близко друг к другу, а непохожие – далеко. На рисунке 4 представлена реализация контрастивной функции потерь в виде класса.

```
class ContrastiveLoss(nn.Module):
    def __init__(self, margin=2.0):
        super(ContrastiveLoss, self).__init__()
        self.margin = margin
        self.eps = 1e-9

    def forward(self, embedding1, embedding2, target):
        distance = F.pairwise_distance(embedding1, embedding2, p=2, eps=self.eps)

        loss_similar = target.float() * torch.pow(distance, 2)

        loss_dissimilar = (1 - target.float()) * torch.pow(
            torch.clamp(self.margin - distance, min=0.0), 2
        )
        loss = torch.mean(loss_similar + loss_dissimilar)
        return loss
```

Рисунок 4 – Контрастивная функция потерь

Совместно с функцией потерь для обучения нейронной сети применялся оптимизатор *Adam* – алгоритм, отвечающий за обновление параметров нейронной сети в процессе обучения для минимизации функции потерь. Данный оптимизатор объединяет в себе лучшие идеи двух других мощных методов оптимизации: *Momentum* и *RMSprop*, что позволяет эффективно и быстро находить оптимальные параметры модели, значительно сокращая время обучения. В качестве параметра оптимизатор использует коэффициент скорости обучения, который определяет, насколько велики шаги, который он делает при обновлении весов и смещений модели в направлении уменьшения функции потерь.

Для получения качественной модели важно выбрать оптимальную скорость, так как при высокой скорости обучения модель учится быстро, однако может снизиться точность настройки модели на минимум функции ошибки, что потенциально увеличит ошибку обучения. При низкой скорости модель учится медленно, но более тщательно, что может привести к лучшей сходимости, однако требуется больше времени на обучение. С учетом результатов работы коллег [17] для разрабатываемой нейронной сети был выбран коэффициент 0,0001.

В процессе обучения модель проходит эпохи – проходы обучающего набора данных через нейронную сеть. Количество эпох определяет, сколько раз модель будет видеть весь обучающий набор. Если нейронная сеть проходит через малое количество эпох, то может возникнуть ситуация недообучения, когда модель не успевает находить закономерности в данных и не может определить

значимую связь. Если эпох слишком много, модель может переобучиться, то есть алгоритм обучения вырабатывает предсказания, которые слишком близко или точно соответствуют конкретному набору данных и поэтому не подходят для применения алгоритма к дополнительным данным или будущим наблюдениям. Для разрабатываемой системы нейронная сеть обучалась в течении 30 эпох. Обучение модели проводилось в среде *Kaggle* с использованием видеокарты *NVIDIA Tesla P100* с объемом памяти *16GB*.

На рисунке 5 представлена последовательность работы алгоритма обучения нейронной сети. В начале работы функция переводит модель в режим обучения, что активирует специфическое поведение определённых слоёв, таких как *Dropout* и *BatchNorm*, предназначенное для тренировочного процесса. После чего происходит последовательная обработка пакета данных. Каждая порция данных, состоящая из двух изображений и соответствующих им меток, немедленно перемещается на вычислительное устройство для максимального ускорения. Перед каждым прямым проходом и вычислением градиентов, оптимизатор обнуляет все ранее накопленные градиенты, гарантируя, что каждое обновление параметров модели основано исключительно на текущем наборе данных. Затем происходит прямой проход: модель принимает обе пары изображений и генерирует для них два отдельных эмбеддинга. Эти эмбеддинги подаются в функцию потерь, которая оценивает, насколько хорошо модель справляется с задачей распознавания сходства или различия между ними, основываясь на предоставленных метках. После вычисления потерь, происходит обратный проход, где *PyTorch* автоматически вычисляет градиенты всех параметров модели относительно этих потерь. В завершение итерации, оптимизатор использует полученные градиенты для обновления весов и смещений модели. Таким образом, модель «учится» и корректирует свои внутренние параметры.

В процессе обучения и тестирования нейронной сети собирались данные о среднем значении функции потерь и число точных предсказаний модели на протяжении всех эпох. На основе этих значений были составлены графики для оценки работы модели. На рисунке 6 представлен график значений функции потерь для обучающего и тестирующего набора данных. В целом, на протяжении обучения и тестирования нейронная сеть значение функции потерь было низком. Это означает, что ошибок, совершенных моделью, было мало. На рисунке 7 показан график точности предсказаний модели. Из графика видно, что в начале обучения точность нейронной модели составляла 63%, а в процессе тренировки модель совершенствовалась, и это значение в конце 30-й эпохи достигло почти 87%. Такое значение говорит о том, что модель дает правильные предсказания и в целом работает исправно.

Экспериментальные испытания системы проводились с использованием автономного летательного аппарата, оборудованного видеокамерой высокого разрешения. Важной особенностью эксперимента являлось полное отключение внешних устройств приема сигналов *GPS*/ГЛОНАСС. Это позволило оценить способность системы функционировать исключительно на основе визуальной информации и собственных вычислительных ресурсов.

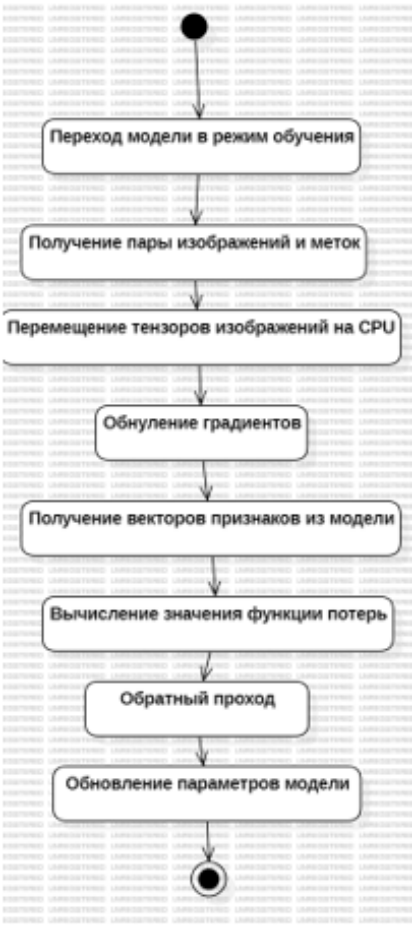


Рисунок 5 – Последовательность работы алгоритма обучения нейронной сети

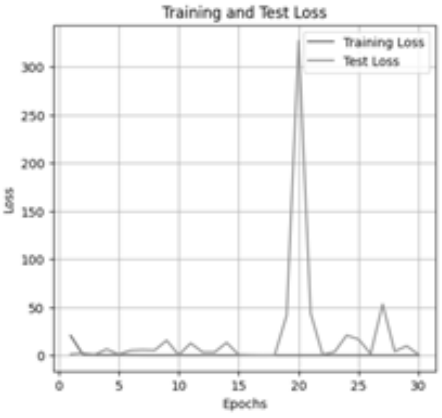


Рисунок 6 – График потерь во время обучения и тестирования по эпохам

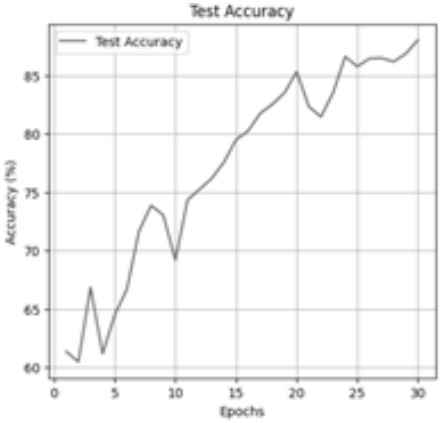


Рисунок 7 – График точности предсказаний нейронной сети

Обсуждение. Эффективность и надежность разработанной навигационной системы на основе распознавания объектов в открытых спутниковых картах были оценены количественными показателями на этапе экспериментальных испытаний. Определилась точность позиционирования текущего местоположения летательного аппарата относительно заданного маршрута. Для оценки точности использовались метрики среднеквадратической погрешности *RMSE* (*Root Mean Square Error*) [18]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(d_i - d_i')^2}$$

где N – количество контрольных точек, d_i – истинное расстояние до цели, d_i' – измеренное системой расстояние. Среднее значение ошибки составило 2,8%, что соответствует высокоточному уровню позиционирования.

Эффективность выбора маршрута оценивалась как доля правильно выбранных траекторий на каждом участке пути. Как было указано ранее, алгоритм построения маршрута основывался на применении метода Брезенхема, гарантирующего минимальное покрытие области при выборе необходимого числа тайлов. Средний коэффициент эффективности маршрута составил 97,3% и рассчитывался по формуле

$$E_{effic} = \frac{N_{covered}}{N_{total}} \times 100\%$$

где $N_{covered}$ – число тайлов, покрытых оптимальным маршрутом, N_{total} – общее число возможных тайлов вдоль выбранного направления.

Скорость реакции навигационной системы на изменения окружающей обстановки также играет важную роль в ее работе. Среднее время отклика системы на изменение ситуации составило 0,25 секунды, что ниже порогового значения приемлемых задержек в системах реального времени [19]. Испытания также показали, что вероятность возникновения критических отказов разработанной системы крайне низка и составила 0,05%. Все зафиксированные случаи ошибок являлись результатом временных проблем с качеством сигнала камеры, но ни один инцидент не привел к существенному нарушению работоспособности системы. Важно отметить, что расход энергии системы остался стабильным и составил 2,5 Вт во время активной эксплуатации летательного аппарата. Оптимизация энергопотребления позволила обеспечить длительную автономную работу оборудования, демонстрируя экономичность и энергоэффективность.

Экспериментальные исследования подтвердили надежность разработанной системы применительно к решению поставленных задач. Вместе с тем, следует подчеркнуть необходимость дальнейшего совершенствования системы ввиду возможной неустойчивости к внешним воздействиям, а именно к уровню освещенности и погодным условиям [20]. Существующие ограничения определяют направление последующих исследований, ориентированных на увеличение робастности и расширение области применения разработанного подхода.

Выводы. Проведенное исследование открывает широкие перспективы для дальнейших разработок и совершенствование технологий автономного позиционирования и навигации. Представленная система демонстрирует потенциал эффективного применения современных методов компьютерного зрения и машинного обучения в различных областях науки и техники. Результаты экспериментов подтвердили высокую эффективность предлагаемого в работе подхода и позволяют сделать следующие выводы:

– навигационная система успешно справилась с поставленными задачами, продемонстрировав точное определение текущих координат и направление дальнейшего движения объекта, несмотря на отсутствие связи с глобальными системами позиционирования;

– отсутствие критических сбоев свидетельствует о надежности разработанных методов и возможности практического внедрения данной технологии в условиях ограниченной доступности инфраструктуры навигационной поддержки.

Проведенное исследование обладает значительным потенциалом для применения в широком диапазоне научных дисциплин и технических направлений и вносит вклад в дальнейшее развитие современной навигации, робототехники, экологии и многих других сфер человеческой деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Алёшин, И.М. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в геомагнитных исследованиях / И.М. Алёшин, А.А. Соловьёв, М.И. Алёшин, Р.В. Сидоров, Е.Н. Соловьёва, К.И. Холодков // Наука и технологические разработки. – 2019. – Т. 98, № 3. – С. 32-48.

2. Хуррамов Ж.А. и др. Обзор и сравнительный анализ систем посадки летательных аппаратов // Universum: технические науки. – 2025. – Т. 2. – №. 3 (132). – С. 24-30.

3. Латыпова А.Р. Анализ развития систем навигации крупноформатных пространств. Поиск проблем // Вестник магистратуры. – 2024. – С. 55.

4. Бегун Д.Н. и др. О необходимости повышения уровня навигационной грамотности населения в современном здравоохранении (обзор) // Менеджер здравоохранения. – 2024. – №. 8. – С. 26-34.

5. Ляпунцова Е.В., Белоусова Е.А. Нейроинтерфейсы и искусственный интеллект: применение и проблемы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №. 7. – С. 346-350. doi:10.21045/1811-0185-2024-8-26-34.

6. Маммадов А.З. Модель инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов // Universum: технические науки. – 2021. – 5(86).

7. Конченко Л.Н., Руденко О.В. Сиамская нейросеть для верификации подписей //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – №. 5-1 (104). – С. 324-329. doi:10.24412/2500-1000-2025-5-1-324-329.

8. Бурукина И.П., Гришаев Д.А., Фельдман Г.О. Выявление изображений, сгенерированных нейросетями // Вестник Пензенского государственного университета. – 2025. – № 1(49). – С. 28-31.

9. Valero-Mas J.J., Gallego A.J., & Rico-Juan J.R. An overview of ensemble and feature learning in few-shot image classification using siamese networks // Multimed Tools Appl 83. – 2024. – P. 19929-19952. https://doi.org/10.1007/s11042-023-15607-3.

10. Zhang, Z. Classification with deep neural networks and logistic loss / Z. Zhang, L. Shi, D.X. Zhou // Journal of Machine Learning Research. – 2024, №.125. – P. 1-117.

11. Wan J. et al. An Improved ResNet50 for Environment Image Classification // Procedia Computer Science. – 2024. – P. 1000-1007. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.08.246 (дата обращения 01.07.2025).

12. Basavaraju N.S., Basavaraja P.H. ResNet50-deep affinity network for object detection and tracking in videos // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. – 2024. – Т. 11. – №.111. – P. 190. doi:10.19101/ijatee.2023.10102017.

13. Flores G., Gallardo C. Creating Shapefile Files in ArcMap from KML File Generated in My Maps // Advances in Emerging Trends and Technologies. – 2020. – P. 1302. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63665-4_15.

14. Денисова Т.В., Золин А.Г., Ларкина А.А. Разработка системы компьютерного зрения для определения показаний приборов учета давления // Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки. – 2023. – С. 237-241. doi. 10.34755/irok.2023.67.41.049.

15. Ямашкина Е.О., Ямашкин С.А., Никулин В.В. Актуализация базы данных репозитория нейросетевых моделей // Огарёвские чтения. – 2022. – С. 497-502.

16. Chen T., Luo C., Li L. Intriguing properties of contrastive losses // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2021. – Т. 34. – P. 11834-11845.

17. Narkhede M.V., Bartakke P.P. & Sutaone M.S. A review on weight initialization strategies for neural networks. Artif Intell Rev 55. – 2022. – P.291-322. doi.org/10.1007/s10462-021-10033-z.

18. Hodson T.O. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not // Geoscientific Model Development Discussions. 2022. – Т. 2022. – P. 1-10. doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022.

19. Шелест М.Н., Татарникова Т.М. Оценка граничных значений среднего времени отклика на запрос пользователя информационной системы //Программные продукты и системы. – 2022. – Т. 35. – №. 3. – С. 488-492. doi:10.15827/0236-235x.139.488-492.

20. Прохорцов А.В., Балабаев О.С. Обзор бесплатформенных инерциальных навигационных систем отечественного и импортного производства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №. 7. – С. 350-355. doi:10.24412/2071-6168-2024-7-350-351.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.823
EDN: ZUPNFO

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ СЕТИ *U-NET* В АППАРАТНО-ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ СРЕДСТВ ПОДДЕРЖКИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© Автор(ы) 2025

SPIN-code: 4017-7027
AuthorID: 1127924
ORCID: 0009-0005-6127-3138
ResearcherID: KFF-5419-2024
ScopusID: 57391985300

БЛИННИКОВ Александр Вениаминович, аспирант,
ассистент кафедры «Информационных технологий и математического обеспечения информационных систем»
Красноярский государственный аграрный университет
(660049, Росссия, г. Красноярск, пр.Мира, 90, e-mail: info@kgau.ru)

Аннотация. Настоящее исследование посвящено разработке методологии цифровой реставрации архивного видеоконтента, подвергшегося деградации вследствие длительного хранения, с целью сохранения его исторической, информационной и культурной ценности. Объектом анализа выступают причины цветовой деградации, включая доминирование оттенков magenta, шумы, царапины и утрату четкости. Задачи исследования охватывают разработку алгоритмов линейной цветокоррекции и нейросетевой обработки с использованием генеративно-состязательных сетей (*GAN*) и архитектуры *U-Net* с механизмами внимания. Предлагаемая методика интегрирует высокоточное сканирование киноплёнки, коррекцию *RGB*-каналов математическими алгоритмами, нейросетевое восстановление цветовой информации и нелинейную постобработку методом опорных точек для устранения дефектов. Оценка качества реставрации проводилась с применением метрик *PSNR, SSIM, VIF, CIEDE2000* и *NIQE*, демонстрирующих значительное снижение цветовых искажений и улучшение визуальных характеристик. Разработанная технология обладает потенциалом для масштабируемой реставрации архивов и применима в научных, образовательных и культурных проектах, обеспечивая сохранение и доступность видеоматериалов для широкой аудитории.

Ключевые слова: цифровые преобразования, восстановление цвета, коррекция цветовой деградации, архивное видео, генеративно-состязательные сети, *U-Net*, цветокоррекция, машинное обучение, *NIQE*, *CIEDE2000*, нелинейная постобработка, цифровая реставрация.

APPLICATION OF THE *U-NET* GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORK IN THE HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF DIGITAL TECHNOLOGY SUPPORT FOR NON-LINEAR IMAGE POST-PROCESSING

© The Author(s) 2025

BLINNIKOV Alexander Veniaminovich, post-graduate student,
assistant of the Department of Information Technologies and Mathematical Support of Information Systems
Krasnoyarsk State Agrarian University
(660049, Russia, Krasnoyarsk, Ave. Mira 90, e-mail: info@kgau.ru)

Abstract. This study is dedicated to developing a methodology for the digital restoration of archival video content degraded due to prolonged storage, aiming to preserve its historical, informational, and cultural value. The analysis focuses on the causes of color degradation, including magenta tint dominance, noise, scratches, and loss of sharpness. The research objectives encompass the development of linear color correction algorithms and neural network-based processing using generative adversarial networks (*GAN*) and *U-Net* architecture with attention mechanisms. The proposed methodology integrates high-precision film scanning, *RGB* channel correction via mathematical algorithms, neural network-based color restoration, and nonlinear post-processing using control point methods to eliminate defects. Restoration quality was evaluated using *PSNR, SSIM, VIF, CIEDE2000*, and *NIQE* metrics, demonstrating significant reduction in color distortions and improved visual characteristics. The developed technology offers potential for scalable archive restoration and is applicable in scientific, educational, and cultural projects, ensuring the preservation and accessibility of video materials for a wide audience.

Keywords: digital transformations color restoration, color degradation correction, archival video, generative adversarial networks, *U-Net*, color correction, machine learning, *NIQE, CIEDE2000*, non-linear post-processing, digital restoration.

Для цитирования: *Блинников А.В. Применение генеративно-состязательной сети U-Net в аппаратно-программном комплексе средств поддержки цифровых технологий нелинейной постобработки изображений / А.В. Блинников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 31-40. – EDN: ZUPNFO.*

Введение. На современном этапе научно-технического прогресса, сопровождающегося стремительным развитием цифровых технологий, проблема сохранения и восстановления архивного видеоконтента становится всё более важной [1]. В настоящее время, как отмечается многими исследователями (Л.Д. Ложкин [2], М.Н. Фаворская [3, 27], X. Yi, S. Weiss, S. Son [6], Liu L., Catelli E., Katsaggelos A., Sciutto G., Mazzeo R., Milanic M., Stergar J., Prati S., Ячная, В.О. [10], Walton M. [11], Д.С. Жук, И.С. Азаров [14], Wang, Y., Xia, M., Qi, L., Shao, J., & Qiao, Y. [15] и др. [16-28]), все актуальнее становится поиск информационных методик и технологий для достижения цветокоррекционных и цветореставрационных целей, с применением нейросетевых технологий, в стремительно развивающемся информационном обществе. В условиях возрастающих угроз, связанных с технологиями *Deepfake*, которые позволяют манипулировать визуальными данными, а также в контексте переписывания исторических фактов и ужесточения требований к качеству видеоматериалов, процесс оцифровки и сканирования архивных кино- и видеоизображений приобретает особую значимость. Поскольку динамический процесс утраты информационных фондов является одной из серьёзных проблем прикладной информатики. Краснота на архивной кинопленке представляет собой явление цветового выцветания, при котором происходит неравномерное разрушение цветных дубильных слоев, в результате чего преобладает *magenta* (пурпурно-красный) оттенок. Это происходит из-за того, что циан и желтый слои выцветают быстрее, чем *magenta*, что приводит к появлению розового или красноватого оттенка на кинопленке. Этот процесс обусловлен химическими реакциями, протекающими в цветных слоях кинопленки, и может быть замедлен путем хранения пленки при низких температурах [4].

Ключевые проблемы при переводе аналоговых носителей в цифровой формат включают цветокоррекцию и восстановление цветового баланса. Особенно остро эта проблема проявляется при работе с позитивными изображениями 3-й категории, которые подвергаются значительным диффузным изменениям в процессе длительного хранения. Эти изменения приводят к искажению цветопередачи, потере деталей и ухудшению качества изображения, включая распространённую проблему «ухода в красноту». Восстановление цвета на таких пленках представляет собой сложную задачу, требующую применения современных технологий, включая нейросетевые подходы для цифровой постобработки сканкопий архивного видеоконтента.

Современные методы машинного обучения, такие как генеративно-состязательные сети (*GAN*) [5] с *attention*-механизмами, позволяют эффективно восстанавливать цветовой баланс и улучшать качество изображений. Однако успешное применение этих методов требует тщательной подготовки данных [6] и создания качественных датасетов для обучения нейронных сетей.

В контексте цифрового восстановления архивных кино- и видеоизображений под уровнем обработки понимается формализованная стадия или комплекс процедур цифровой постобработки, направленных на минимизацию специфических дефектов изображения, возникших в результате деградации носителя либо искажений процессов сканирования. Каждый уровень обработки характеризуется:

– набором алгоритмов, применяемых к изображению (например, линейная цветокоррекция, устранение шума, нейросетевое восстановление структуры, удаление артефактов);

– специфическими метриками контроля качества на выходе;

– ориентацией на устранение конкретных видов дефектов (глобальный *color cast*, локальные артефакты, выцветание и др.);

– возможностью интеграции экспертной верификации на стыке между уровнями.

В полиуровневой архитектуре (например, комбинирующей классические методы коррекции и глубокие сверточные сети/архитектуры с *attention*-механизмами) под уровнем подразумевается определённый этап цифрового конвейера, обладающий независимым решающим правилом перехода к следующей стадии.

В данной статье представлен гибридный подход к восстановлению архивных видеоматериалов с использованием: метод линейного цветового выравнивания с параметрической оптимизацией, нейросетевой метод, а так же метод линейной цветокоррекции по опорным точкам. Подход включает несколько этапов: от первичной обработки изображений до применения сложных алгоритмов минимизации цветовой деградации [7].

Также в статье представлены результаты сравнительного анализа качества обработанных изображений с использованием программ: *MSU Video Quality Measurement Tool* (*MSU VQMT*) и в разработанной автором программе сравнения между исходным сканированным изображением и изображениями, обработанными моделями, по ряду метрик (*PSNR, AbsDiff, VIF, CIEDE2000*(*red*)), подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Основная цель исследования заключается в разработке гибридных методик оцифровки и восстановления архивных кино- и видеоизображений для минимизации цветовой деградации и повышения качества видеоконтента.

Методология. Аппаратно-программный комплекс, реализованный в данном исследовании, состоит из профессионального сканирующего оборудования, высокопроизводительных вычислительных систем и специализированного программного обес-

печения для нейросетевой обработки. Основой алгоритмического ядра является классификация *GAN*-архитектуры с модифицированным *U-Net*-генератором, поддерживающим *self-attention*, позволяющая последовательно устранять дефекты цифровых сканкопий архивного видеоматериала и обеспечивать качественное цветовое восстановление. Все этапы восстановления интегрированы в единую обработку (табл. 1), что обеспечивает масштабируемость и адаптивность решения по отношению к различным видам киноматериалов.

Устройства для сканирования и оцифровки киноплёнки:

– *Cintel Scanner C-Drive HDR+* – профессиональный сканер 35 мм, 16 мм и 8 мм киноплёнки, обеспечивающий высокодинамичный диапазон (HDR) и сохранение цветовой информации при оцифровке.

– *WinAp DV1802017040061* – специализированный сканер для форматов 8 мм и *super* 8, используемый при реставрации домашнего и документального киноархива.

Средства обработки и хранения:

– Рабочая станция *Apple Mac Studio MQH63* (*M2 Ultra, 24-Core CPU, 60-Core GPU, 64GB RAM, 1TB SSD*).

Использовалась для хранения, обработки сканкопий и проведения вычислений при обучении и инференсе нейросетевых моделей.

Аппаратная платформа позволила реализовать ускоренное (*GPU*-enhanced) выполнение свёрточных сетей и обеспечить одновременную работу с большими объёмами видеоданных.

ПО и монтаж:

– Редактирование и предварительная цветокоррекция осуществлялась в *Davinci Resolve Studio 20* – профессиональном инструменте для постобработки видео и мастеринга.

– Цифровая нейросетевая обработка осуществлялась с использованием программного продукта "Цифровое восстановление" – собственной разработки.

Таблица 1 – Структура аппаратно-программного комплекса

Компонент	Назначение	Примечания
Cintel Scanner C-Drive HDR+	Сканирование кинофильма, оцифровка 35/16/8 мм	Поддержка HDR
WinAp DV1802017040061	Оцифровка 8 мм, super 8	Архивное кино и хроники
Apple Mac Studio MQH63	Хранение и нейросетевая обработка	Ускорение GAN/U-Net на GPU
Davinci Resolve 20	Редактирование провизуальных сканкопий	Промежуточная коррекция
"Цифровое восстановление"	Глубокая нейросетевая восстановительная обработка	Archival restoration AI

Основной целью данного исследования является разработка и внедрение гибридной методики оцифровки и восстановления архивных кино- и видеоизображений (входящих в основной фильмофонд КГАУК «Енисей кино»), которые позволяют минимизировать цветовую деградацию, улучшить цветопередачу и повысить общее качество видеоконтента. Для достижения поставленной цели в исследовании решаются следующие задачи:

1. Анализ проблем цветовой деградации в архивных киноматериалах. Исследование направлено на выявление основных причин искажения цветопередачи в позитивных изображениях 3-й категории, таких как диффузные изменения, уход в «красноту» и потеря деталей.

2. Разработка параметрической линейной коррекции цветовых каналов. Предложен алгоритм, основанный на линейном преобразовании цветовых каналов (*R, G, B*), который позволяет минимизировать отклонения между исходными и целевыми значениями.

3. Разработка линейной цветокоррекции по опорным точкам. Предложен упрощённый алгоритм линейной нормализации динамического диапазона изображения, без учёта цветового баланса(*Black and White Point Adjustment методом Percentile Based Clipping*).

4. Создание и обучение нейронной сети для восстановления изображений. Использование генеративно-состязательных сетей (*GAN*) с *attention*-механизмами и архитектуры *U-Net* для улучшения качества изображений, фокусируясь на проблемных областях.

5. Оценка эффективности предложенных методов. Проведение сравнительного анализа качества обработанных изображений с использованием программ: «*MSU Video Quality Measurement Tool*» (*MSU VQMT*), «*SSIM&AbsDIFF* анализатор» и «*Image&Video metrics+*»

6. Разработка комплексного подхода к обработке архивных видеоматериалов. Интеграция предложенных методик в единый процесс, включающий сканирование, цветокоррекцию, повышение резкости и нелинейную постобработку.

7. Практическое применение технологий для восстановления архивных материалов. Демонстрация эффективности предложенных решений на примере обработки конкретных архивных видеоматериалов, таких как киножурналы и документальные фильмы и хроники.

Технологии выравнивания цветовой деградации на сканированных позитивных изображениях 3-й категории и алгоритмы восстановления цвета на сканкопиях архивного видеоконтента при помощи системы моделей машинного обучения существенно помогают восстанавливать изображения, ушедшие в «красноту». Для этого требуется подготовить соответствующий сканированный материал [8] для

наиболее качественной Базы данных, применение которого необходимо при обучения генеративно-состязательной сети, включающей *attention*-механизм, помогающий модели фокусироваться на ключевых частях визуальных данных, что улучшает качество нелинейной постобработки [9].

Была разработана математическая модель для анализа деградации цвета в изображениях. Цель алгоритма – минимизация цветовой деградации в каналах изображения (*R, G, B*) путём подбора параметров линейного преобразования. Процесс основан на минимизации отклонения между исходными каналами и заданными целевыми каналами, используя оптимизацию параметров (*slope, intercept*) [11].

Для повышения точности восстановления и улучшения визуального качества изображений после базовой линейной коррекции дополнительно применялась генеративно-состязательная нейросетевая архитектура. Основу модели составляла модифицированная версия *U-Net*, усиленная *attention*-механизмами, позволяющими фокусировать внимание на участках с выраженной цветовой деградацией. Это особенно актуально при обработке изображений с неравномерными искажениям цвета и потерей локального контраста.

Архитектура использовала принципы *encoder-decoder,* в которых энкодер извлекает глубокие признаки изображения, а декодер восстанавливает их в высококачественное изображение. Важным элементом являлись *skip*-соединения, соединяющие соответствующие уровни энкодера и декодера, что позволило сохранить пространственную информацию и восстанавливать мелкие детали.

Для повышения контекстной осведомлённости и повышения чувствительности модели к важным областям изображения был внедрён механизм *Self-Attention*, интегрированный в боттлнек-части сети. Это позволяло учитывать взаимосвязи между пикселями в глобальном масштабе, а не только в пределах локальных свёрток.

Обучение модели проводилось на специализированной выборке, включающей сканированные изображения с различной степенью деградации, что обеспечивало обобщающую способность алгоритма. Потери рассчитывались на основе комбинации *MSE* (*Mean Squared Error*) и *Perceptual Loss*, где последняя использует извлечённые признаки предобученной *VGG*-сети для сравнения восприятия между восстановленным и эталонным изображением.

На финальном этапе для устранения перекосов яркости и цветового баланса использовалась автоматическая цветокоррекция на основе растяжения гистограммы по каждому цветовому каналу. В качестве порогов чёрной и белой точек были выбраны значения 1-го и 99-го процентилей соответственно, что позволило минимизировать влияние выбросов и шумов.

Решающее правило принятия решения, подтверждающее повышение качества восстановления изображения. При отсутствии "*ground-truth*" (идеального эталонного изображения), как это типично для архивных материалов, для объективной оценки повышения качества восстановления изображения предлагается использовать комплексное решающее правило, основанное на симбиозе нескольких метрических критериев:

1. Для наличия эталонного кадра-референса (абсолютная оценка).

Оценка значимого прироста по следующим метрикам:

– *PSNR* (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) – увеличение значения относительно исходного;

– *SSIM* (*Structural Similarity Index*) – приближение к единице;

– *VIF* (*Visual Information Fidelity*) – рост показателя;

– *CIEDE2000*(*red*) – уменьшение отклонения по красному/пурпурному компоненту к нулю.

Решающее правило: уровень обработки признаётся повышающим качество, если по крайней мере две из трёх метрик (*PSNR, SSIM, VIF*) демонстрируют статистически значимое улучшение по сравнению с предыдущим уровнем, а также наблюдается снижение абсолютного значения *CIEDE2000*(*red*).

2. При отсутствии эталонного кадра (без "*ground-truth*"; *no-reference*).

Использование *NR-IQA* (*No-Reference Image Quality Assessment*) метрик:

– *NIQE* (*Natural Image Quality Evaluator*) – чем ниже значение, тем выше качество визуального результата;

В дополнение фиксируется визуальная инспекция экспертами на основе регламента (например, отсутствие цветовых артефактов, улучшение детализации).

Решающее правило: уровень обработки признаётся улучшенным, если наблюдается снижение значения *NIQE* относительно изначального (до обработки) не менее чем на заранее установленный порог, при отсутствии появления новых визуальных артефактов на экспертной проверке.

Таблица 2 – Симбиоз используемых метрик

Метрика	Тип оценки	Критерий успешности	Интерпретация прироста качества
PSNR	Reference	Увеличение	Меньше шумов, выше детализация
SSIM	Reference	Приближение к 1	Структурная схожесть
VIF	Reference	Повышение	Визуальная информативность
CIEDE2000 (red)	Reference	Уменьшение модуля отклонения	Коэффициент корректности цветовой реставрации по красному цвету
NIQE	No-reference	Снижение	Ближе к “естественному” изображению

Такой гибридный подход (табл. 2) позволяет объективно фиксировать этапы повышения качества восстановления изображения на каждом уровне обработки, включая случаи отсутствия эталонного изображения.

Результаты. *Выравнивание деградации цвета в изображениях гибридной моделью на основе сверточной нейронная сети.* Для корректировки цветового несоответствия между изображением и эталоном был применён метод поканальной линейной коррекции цвета с оптимизацией параметров трансформации. Каждый канал подвергался линейному преобразованию с наклоном и смещением, параметры которых определялись путём минимизации среднеквадратичной ошибки относительно соответствующего канала эталонного изображения.

Алгоритм включает три основные стадии: линейное преобразование [12], оценку ошибки (функцию потерь) и оптимизацию [13]:

А) Линейное преобразование канала [14]. Для данного цветового канала A (где A может быть R, G или B):

$$A' = m \cdot (A - \bar{A}) + \bar{A} + b, \quad (1)$$

где A' – преобразованный цветовой канал, m – наклон (*slope*), b – смещение (*intercept*), $\bar{A} = mean(A)$ – значение канала, рассчитанное по всем ненулевым пикселям.

$$A' = clip(A', 0, 255), \quad (2)$$

После применения преобразования, значения канала обрезаются в диапазоне от 0 до 255.

В) Функция потерь [15]. Функция *loss_function*(*params, channel, target_channel*) вычисляет функцию потерь для оптимизации параметров наклона и смещения, она определяется как среднеквадратичная ошибка между преобразованным каналом и целевым каналом:

$$L = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(A_i' - T_i)^2, \quad (3)$$

где L – функция потерь, N – количество пикселей, C' – преобразованный цветовой канал, T – целевой цветовой канал.

Если функция потерь становится бесконечной или неопределенной, она устанавливается в значение бесконечности:

$$L = \begin{cases} L, L < \infty \\ \infty \end{cases}, \quad (4)$$

С) Оптимизация параметров [16]. Функция *optimize_channel_parameters* (*channels, target_channels*) оптимизирует параметры наклона и смещения для каждого цветового канала.

Процесс оптимизации:

Для каждого цветового канала *Acolor*:

Инициализация параметров:

Наклон: m=1.0

Смещение: b=0.0

Оптимизация с использованием метода минимизации (метод Пауэлла [17]):

Минимизируется функция потерь $L(m, b)$.

Ограничения на параметры:

Наклон: $m \in [-5, 5]$

Смещение: $b \in [-100, 100]$

В случае успешной оптимизации параметры обновляются:

Если оптимизация не удалась, используются параметры по умолчанию.

Далее использовался *GAN* с *attention* [18], чтоб модель могла лучше фокусироваться на проблемных областях [19], сверточная нейронная сеть архитектуры *U-Net* [20].

Модель *UNet6* состоит из энкодера и декодера [21] и реализована в виде шестиуровневой сети.

Энкодер: на этапах энкодера изображение сжимается с помощью сверток и операций *MaxPooling*, что позволяет извлекать высокоуровневые признаки на каждом уровне. То есть, кодировщик состоит из последовательности свёрточных слоёв (*nn.Conv2d*) и функции активации *ReLU*. Входное изображение имеет 3 канала (*RGB*). Каждый уровень кодировщика увеличивает количество каналов, уменьшая пространственные размеры с помощью *MaxPool2d*.

nn.Conv2d – 2D-свёртка для извлечения признаков.

padding_mode="reflect" – добавляет отражающее заполнение, создавая границы изображения.

nn.MaxPool2d – уменьшает размеры изображения в 2 раза.

Таким образом свертка настроена с использованием отражающего режима заполнения (*padding_mode="reflect"*), что помогает сохранить контуры изображений и избежать артефактов на границах.

Декодер: на этапе декодера происходит расширение изображения с помощью операций *Upsampling* и объединение высокоуровневых признаков с низкоуровневыми.

nn.Upsample – увеличивает пространственные размеры изображения.

Слияние данных с уровнями кодировщика (*torch.cat*) – это "*U*"-образная структура, характерная для *U-Net* [22]. Признаки из кодировщика на каждом уровне передаются в декодировщик через пропускные соединения.

Свёрточные слои уменьшают количество каналов до 3 (выходное изображение).

Это объединение позволяет модели восстанавливать детали, которые были сжаты на этапе энкодирования [22]. Выходной слой использует *Tanh*, чтобы нормализовать значения пикселей в диапазоне [-1, 1].

В цветном изображении $I \in \mathbb{R}H \times W \times 3$, где H и W – высота и ширина изображения соответственно, а 3 канала представляют синие (*B*), зелёные (*G*) и красные (*R*) составляющие. Используется преобразование к интенсивности в оттенках серого:

$$I_{gray}(x, y) = 0{,}299\mathrm{R}(x, y) + 0{,}299\mathrm{G}(x, y) + 0{,}299\mathrm{B}(x, y), \quad (5)$$

по стандартной формуле яркости в пространстве *BGR*.

Затем определяются координаты методом на

основе *percentiles*. Для каждого канала изображения $C \in \{R, G, B\}$ проводится линейная нормализация:

$Cp1$ = перцентиль1(C)

$Cp2$ = перцентиль99(C)

Корректируем каждый пиксель канала по формуле:

$$C'(x, y) = \min(255, \max(0, \frac{C(x,y) - C_{p1}}{C_{p2} - C_{p1}} \cdot 255)), \quad (6)$$

где: $C'(x, y)$ – значение пикселя после коррекции, $[Cp1, Cp2]$ – интервал, внутри которого лежат 98% значений пикселей канала (отсекаются экстремумы – шум, выбросы).

Скорректированные каналы объединяются в итоговое изображение:

$$I = merge(B, G, R), \quad (7)$$

Это более устойчивый метод в сравнении с тремя опорными точками, особенно при наличии шумов и артефактов, а так же учитывая применение к каждому изображению видеопоследовательности в потоке.

Используется цветовое пространство *BGR*, а не *RGB*, потому что это стандарт порядка каналов по умолчанию в *OpenCV*.

На рисунке 1 представлена блок-схема работы программы "Цветовое восстановление", иллюстрирующая общую структуру методологии, включающую взаимосвязанные методы обработки изображений и их последовательность для достижения цели восстановления цвета.

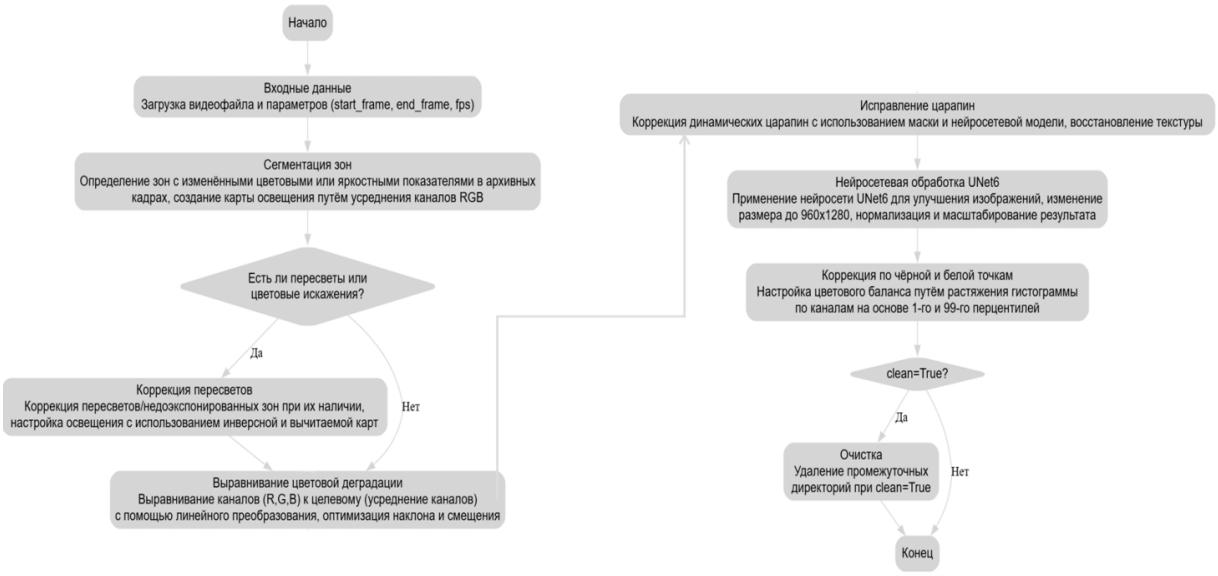


Рисунок 1 – Блок-схема работы программы «Цветовое восстановление»

Обсуждение. Первичная нейросетевая модель отрабатывалась в *pix2pix* [10]: производились стабилизизация, равное обучение генератора и дискриминатора на 350 эпизодах обучения. Было проведено около 60 экспериметов.

Для первичного этапа обучения, учитывая тот факт, что «красные» кадри имели достаточно однородные проблемы с выцветанием, а датасет, данные и их структура были не идеальны – *pix2pix* стал первой ступенью в процессе обучения (рис. 2).

После первичной обработки изображений с применением *pix2pix*-модели, направленной на общую стабилизацию и коррекцию цветовых искажений, была применена вторичная модель, направленная на более глубокую постобработку с учетом локальных артефактов: вертикальных царапин, неоднородного освещения, а также локального цветового дисбаланса.

Второй этап восстановления был реализован как последовательный проход по выходным изображениям из первого этапа.

Данная модель была предварительно обучена на примерах из открытых наборов данных по восстановлению старых изображений, а также на специально подготовленных сканкопиях плёнок из архива Красноярского отделения КГАУК «Енисей кино».

Такое комбинирование источников позволило расширить устойчивость модели к различным видам деградации, включая:

– сегментацию неоднородного освещения, часто возникающего при неравномерном просвечивании старых плёнок;

– коррекцию вертикальных артефактов, таких как микроскопические царапины, тянущиеся по всей длине кадра;

– локальное выравнивание контрастности и цветового баланса с адаптацией под особенности плёнки, наблюдаемые на архивных материалах.

Использование второй модели дало прирост по показателям *SSIM* и *VIF*, особенно в сценах с контрастными объектами и сложной цветовой геометрией.

Также визуально удалось улучшить однородность освещённости, сгладить пятна переэкспонирования, часто наблюдаемые в местах дефек-

тов эмульсии.

Важно отметить, что применяемая архитектура нейросети второго уровня основывалась на модифицированном *U-Net* с включением механизмов внимания (*Attention Blocks*), что позволило сконцентрировать ресурсы модели на восстановлении локальных деталей, сохранив при этом общую структуру кадра. Кроме того, в процесс инференса была встроена функция нормализации цветового профиля с ориентацией на нейтральные зоны изображения – т.н. "серые участки", что сблизило результат с пресетами метода "белой, серой и черной точек".

Сравнительный анализ видео [23] осуществлялся в программах «*SSIM&AbsDIFF* анализатор» по *SSIM* и *AbsDIFF* (индексу меры структурной схожести и вычислению абсолютной разницы (по модулю) между соответствующими пикселями двух изображений) [24], по *PSNR, VIF* и *CIEDE2000* (*red*) в «*MSU Video Quality Measurement Tool*» (*MSU VQMT*) и «*Image&Video metrics+*».

Сравнительный анализ видео осуществлялся покадрово:

– в программе *MSU Video Quality Measurement Tool* (*MSU VQMT*) по ряду метрик (*PSNR, SIMM*);

– в разработанной автором на *Python* программе между исходным сканированным изображением и изображениями, обработанными нейросетевыми моделями, так же по ряду метрик (*PSNR, AbsDiff, VIF, CIEDE2000*(*red*)).

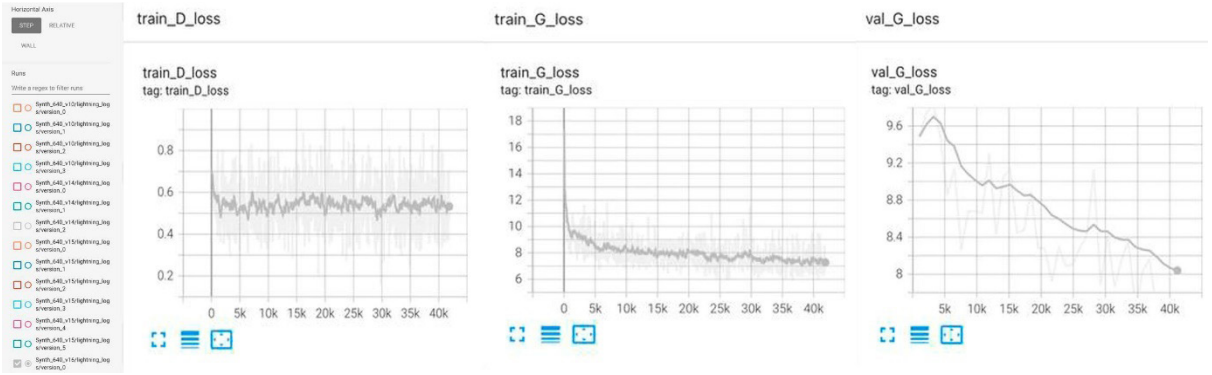


Рисунок 2 – Графики обучения, стремление "train_G" и "val_G" к нулю есть приближение к наилучший результату

На рисунке 3 представлено сравнение исходного сканированного изображения и результатов его обработки различными методами, включая математические алгоритмы и нейросетевую модель. Программа, разработанная автором на *Python*, осуществила покадровый анализ, включая расчет индекса структурного сходства (*SSIM*), что позволило объективно оценить качество восстановленных изображений.

На рисунке 4 представлено сравнение оригинального сканированного кадра с результатами его автоматической цветовой коррекции шестью разными нейросетевыми методами. Изображение имело выраженное искажение цвета из-за сдвига в область *magenta* (избыток красного и розового, дефицит зелёного и синего). Метрика *CIEDE2000*(*red*) использовалась для количественной оценки изменения красной составляющей [25].

Особо показателен именно кадр 0995, так как практически в центре кадра объект с обилием красного и синего цветов, а так же небольшим ярким зелёным элементом.

При обработке применялись стандартные настройки нейросетевых моделей по нейтрализации цветовых и сегментных искажений. Модели *Б* и *Д* при подобных настройках не справились с поставленной задачей (общий красновато-розовый фон остался, причём значительный), модель *Г* ушла в фиолетовый спектр (более того, на иных кадрах отклонение по цветовым гаммам было ещё более значимым), модель *В* хоть и избавилась от общего розоватого фона, но пересвет по яркости и контуры на границах объектов заметны. А модель *Е* справилась с избытком красного, превратив его в серый цвет. Коэффициент *CIEDE2000*(*red*) в модели *Ё* составил 0,83 (табл. 3). Если смотреть только на *PSNR, AVC Labs* и *Topaz* выглядят лучше, но эти модели оставили красные артефакты.

Метрика *CIEDE2000*(*red*), адаптированная под анализ избыточного красного, позволила количественно оценить степень цветового сдвига относительно эталонного серого. Хотя методы вроде *Topaz* продемонстрировали лучшие показатели по *PSNR* и *SSIM*, визуальный анализ показал, что искажение цвета (*magenta*) практически не устранено. Напротив, авторская модель «ЦветовоеВосстановление» показала наибольшую степень вытягивания красного компонента, при этом восстановив и другие цветовые каналы (зеленый, синий), что визуально приближает изображение к реалистичному цветовому балансу.

Так как цель была убрать красные артефакты (минимизируя на цифровой сканкопии *magenta* (пурпурно-красный) оттенок), получить визуально правильный кадр, а так же избавиться от вертикальных царапин – "ЦветовоеВосстановление" справилась с поставленной задачей и результат, несмотря на низкий *PSNR*, положительный (рис. 5).

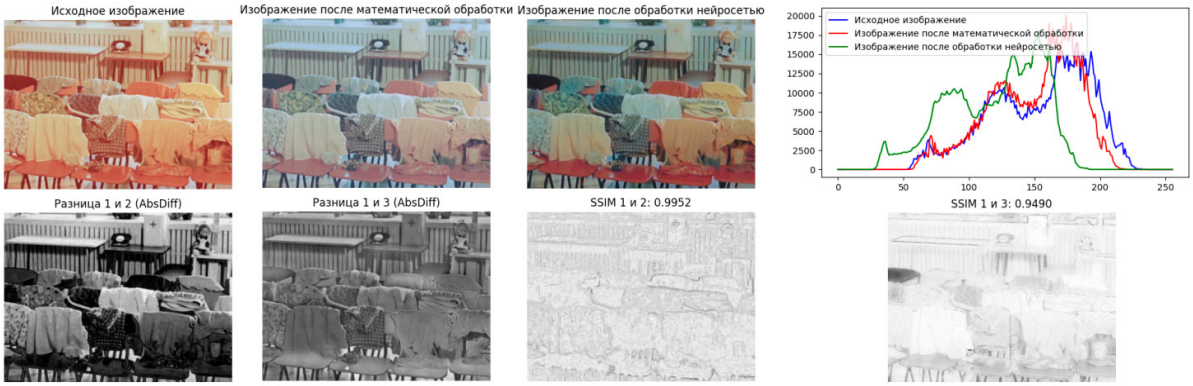


Рисунок 3 – Анализ кадра фильма «Одна мама на всех» 1985 г. и его обработок

Рисунок 4 – А) – скан кинокадра без обработки; Б) – обработка Topaz Video Enhancer AI; В) – обработка Adobe Photoshop AI; Г) – обработка Deep Video Enhancer AI; Д) – обработка Luminar AI; Е) – обработка AVC Labs Video Enhancer AI; Ё) – обработка моделью «ЦветовоеВосстановление»

Таблица 3 – Сравнительная оценка обработки изображения по метрикам качества и цветового отклонения

Наименование	PSNR	SIMM	VIF	CIEDE2000 (red)	Интерпретация цветового отклонения
Topaz Video Enhancer AI	33,5251	0,9804	1,1184	-0,02	Цвет практически не изменён, magenta осталась
Adobe Photoshop AI	28,9020	0,9568	1,3688	0,31	Цвет скорректирован частично, остаточный теплый тон
Deep Video Enhancer AI	28,8026	0,9281	1,7453	-0,12	Лёгкое ослабление красного, искажения в тенях
Luminar AI	30,3115	0,9933	0,8948	0,22	Умеренная коррекция, тёплая цветовая гамма
AVC Labs Video Enhancer AI	34,9133	0,9292	1,0816	0,56	Заметное усиление красного, особенно на коже
ЦветовоеВосстановление	27,9454	0,9723	0,9283	0,83	Наибольшая коррекция: красный + восстановлены иные цвета

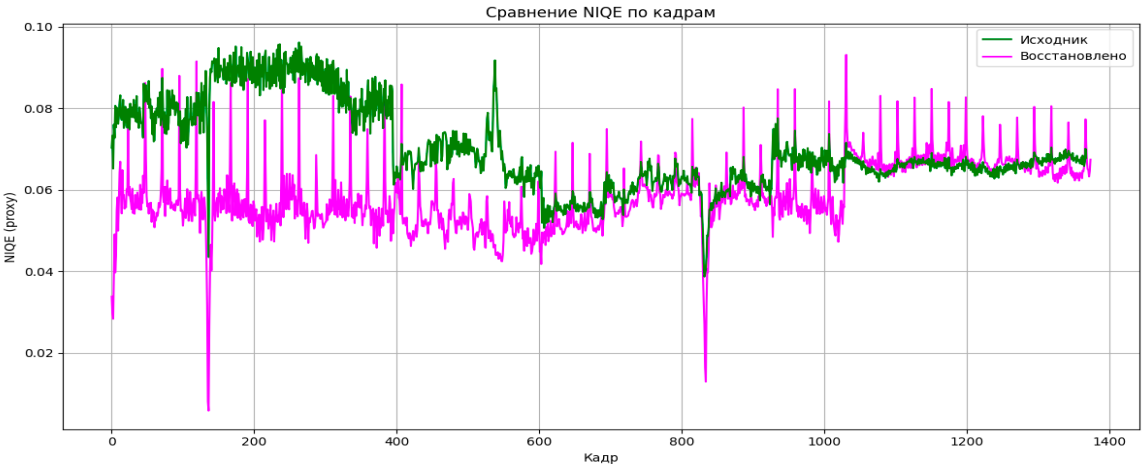


Рисунок 5 – Сравнение сканкопии материалов с преобладанием «маджента» (Исходник) и обработки программой «ЦветовоеВосстановление» (Восстановлено) по метрике NIQE (Показатель качества естественного изображения)

Важно отметить, что простые ручные методы, такие как алгоритм "черной, белой и серой точек", действительно позволяют получить предсказуемый и часто удовлетворительный результат – особенно при известных эталонных значениях. Тем не менее, они работают хорошо в ограниченном спектре задач, не учитывая индивидуальные особенности старения, неоднородности освещения, сенсорные шумы и пленочные дефекты. Потому, модель второго уровня явилась дополнительной ступенью восстановления, направленной не столько на устранение глобального «цветовой сдвиг», сколько на локальное устранение деградаций и приведение изображения к более реалистичному, визуально нейтральному виду, с

сохранением детализации и минимизацией ручной постобработки. Это особенно важно при массовой автоматизированной реставрации киноархивов, где качество должно быть приемлемо высоким, но при этом не требовать участия оператора на каждом шаге.

Следует отметить, что цифровое восстановление является компромиссом между:

– технически возможным (например, устранение красного, восстановление баланса);

– исторически достоверным (реальная цветопередача по эталону);

– визуально приемлемым (отсутствие визуальных артефактов, соответствие ожиданиям зрителя).

Современные нейросетевые архитектуры, такие как *U-Net* и *GAN* с *attention*-механизмами, показывают высокую эффективность [27] в восстановлении архивного видеоконтента, однако их применение ограничено рядом факторов. Во-первых, для обучения таких моделей необходимы качественные и репрезентативные данные, которые трудно получить из-за уникальности и деградации исторических материалов. Цветовые искажения в архивных кадрах неравномерны и зависят от химического состава плёнки, условий хранения и технологии сканирования. Нейросети не способны восстановить утраченную информацию, а попытки «угадать» детали могут привести к искажению исторической достоверности. Кроме того, эти модели являются ресурсоёмкими и работают как «чёрный ящик», что усложняет интерпретацию их решений и контроль качества восстановления.

Для повышения точности и надёжности реставрации архивного видеоконтента целесообразно использовать нейросетевые методы в составе гибридного подхода.

Такой подход включает параметрическую коррекцию, экспертную верификацию и адаптацию алгоритмов под особенности конкретных материалов. *GAN*-модели подвержены риску генерации мнимых деталей, а отсутствие учёта физико-химических процессов деградации снижает достоверность результатов. Объединение нейросетевых методов с традиционными алгоритмами и экспертным контролем позволяет минимизировать артефакты и сохранить историческую ценность восстановленных материалов.

Результаты, представленные в работе, демонстрируют, что при учете специфики архива и контекста задачи нейросетевые методы восстановления могут не просто дополнить существующие подходы, но и предложить новые решения, особенно в массовой автоматизированной обработке оцифрованных архивов [26]. Несмотря на ограниченность модели первого уровня, предложенный путь открывает перспективу развития более точных, адаптивных архитектур, способных учитывать и физические свойства материала, и визуальное восприятие исторического изображения.

Выводы. Аппаратно-программный комплекс, реализованный в данном исследовании, состоит из профессионального сканирующего оборудования (*Cintel Scanner C-Drive HDR+* и *WinAp DV1802017040061*), высокопроизводительных вычислительных систем (*Apple Mac Studio MQH63* с *GPU 60-Core*) и специализированного программного обеспечения для нейросетевой обработки. Основой алгоритмического ядра является классификация *GAN*-архитектуры с модифицированным *U-Net*-генератором, поддерживающим *self-attention*, позволяющая последовательно устранять дефекты цифровых сканкопий архивного видеоматериала и обеспечивать качественное цветовое восстановление. Все этапы восстановления интегрированы в единую обработку, что обеспечивает масштабируемость и адаптивность решения по отношению к различным видам киноматериалов.

В настоящем исследовании впервые предложена технология многоуровневой цифровой обработки видеоматериалов, направленная на восстановление цветовой информации и устранение дефектов старых кинодокументов. Основу метода составляет комбинация алгоритмов линейной цветокоррекции и современных нейросетевых подходов. В отличие от существующих решений, разработанная технология включает:

– первичную нейросетевую реконструкцию с устранением типичных цветовых сдвигов (*color cast*), вызванных старением плёнки;

– автоматическую стабилизацию и очистку изображения от механических повреждений (царапины, пыль, артефакты);

– сегментацию областей с неоднородным освещением;

– вторичный этап обработки на базе сверточных нейросетей *U-Net*-подобной архитектуры, обученных как на общедоступных датасетах, так и на материалах из архива Красноярского отделения КГАУК «Енисей кино».

Применение предложенного подхода продемонстрировало способность эффективно восстанавливать изначальную цветовую палитру, устранять нежелательные цветовые доминанты (например, magenta), а также повысить четкость и визуальное качество видео. Методы количественной оценки качества обработки (*PSNR, SSIM, VIF, CIEDE2000*) подтвердили конкурентоспособность технологии относительно существующих решений. При этом визуальный анализ показал, что формальные метрики не всегда отражают степень исторической и художественной достоверности результата, что подчёркивает важность комбинированного подхода к оценке качества.

Отдельное внимание уделено необходимости учитывать известные механизмы деградации плёночных носителей и соответствовать задачам не только технической, но и культурной реставрации изображения. В контексте архивных материалов значимым становится не только восстановление "правильных" цветов, но и сохранение художественной ценности изображения.

Предложенная система не является альтернативой традиционным методам реставрации, а выс-

тупает в роли вспомогательного инструмента [28], значительно ускоряющего и дополняющего работу специалистов в области цифровой реставрации.

Настоящая работа выполнена при поддержке правительственной стипендии, без привлечения стороннего финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Blinnikov A. Nonlinear transformations of video elements in the morphing applications for event projects. / Aleksanr V. Blinnikov, Igor V. Kovalev, Anna A. Voroshilova, Dmitry V. Borovinsky / AIP Conf. Proc. 12 January 2024; 2969 (1): 060044. doi.org/10.1063/5.0183407

2. Ложкин, Л.Д. Цветокоррекция в современных устройствах цветовоспроизведения / Л.Д. Ложкин, А.А. Солдатов / Радиотехника и электроника, 2018, Т. 63, № 4. – С. 351-356, DOI 10.7868/S0033849418040071.

3. Фаворская, М.Н. Улучшение разрешения снимков ДЗЗ на основе глубоких генеративно-состязательных сетей / М.Н. Фаворская, А.И. Пахирка // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2023): сборник трудов всероссийской конференции с международным участием, Бердск, 22-25 августа 2023 года. – Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий", 2023. – С. 163-168. – DOI 10.25743/sdm.2023.64.95.028

4. Blinnikov, A. Application of discrete digital transformations with nodes on a centered lattice in post-processing of anti-nicotine animation / Alexander V. Blinnikov, Elena Stepanova, & Igor V. Kovalev. (2024) / Global Scientific and Academic Research Journal of Economics, Business and Management, 3(8). – P. 21-25. doi.org/10.5281/zenodo.13347327.

5. Pai, G. Semi-Dense *U-Net*: A Novel *U-Net* Architecture for Face Detection / G. Pai, Sh. K. M / International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2023, Vol. 14. – No. 6. DOI 10.14569/ijacsa.2023.0140643.

6. Moments reconstruction and local dynamic range compression of high order superresolution optical fluctuation imaging / X. Yi, S. Weiss, S. Son [et al.] / Biomedical Optics Express, 2019, Vol. 10, No. 5. – P. 2430-2445, DOI 10.1364/BOE.10.002430.

7. Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок Ge2Sb2Te5 для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений / В.Б. Глухенькая, Н.М. Толкач, П.И. Лазаренко [и др.] / HOLOEXPO 2022: Тезисы докладов. XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Санкт-Петербург, 20-22 сентября 2022 года, Барнаул: Индивидуальный предприниматель Колмогоров Игорь Александрович, 2022. – С. 181-185.

8. High dynamic range spatial mode decomposition / A. W. Jones, C. M. Mow-Lowry, A. Freise, M. Wang / Optics Express, 2020, Vol. 28, No. 7. – P. 10253-10269, DOI 10.1364/OE.389081.

9. Применение нейросети pix2pix для обработки данных микроволновых измерений безэховых камер / Ю.С. Горшкова, С.В. Малый, А.В. Ткаченя, И.Э. Хейдоров / Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2022): материалы III Международной научно-практической конференции, Минск, 21-22 апреля 2022 года, Минск: ГУО «Республиканский институт высшей школы», 2022. – С. 14-17.

10. Ячная, В.О. Исследование устойчивости Условной генеративно-состязательной сети pix2pix к искажению входных данных разметки изображений / В.О. Ячная, В.Р. Луцив / Оптический журнал, 2021, Т. 88, № 11. – С. 46-55, DOI 10.17586/1023-5086-2021-88-11-46-55.

11. Correction of slope-intercept glomerular filtration rate measurement without scaling for body size / H. Mcmeekin, M.T. Burniston, M. Barnfield, A.M. Peters / Nuclear Medicine Communications, 2021, Vol. 42, No. 1. – P. 68-72. DOI 10.1097/mnm.0000000000001302.

12. Liu, L. et al. Digital restoration of colour cinematic films using imaging spectroscopy and machine learning / Liu L., Catelli E., Katsaggelos A., Sciutto G., Mazzeo R., Milanic M., Stergar J., Prati S., Walton M. / Sci Rep, 2022 Dec 20, 12(1): 21982. doi: 10.1038/s41598-022-25248-5.

13. Yang, Y. et al. Color Film Restoration Using a Semi-Automatic Correction Method / Yujiu Yang, Weihao Xia, Jing-Hao Xue, Baoyuan Wu. et al. / In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2024. – P. 2256-2265.

14. Жук, Д.С., Преимущество использования *GAN* в раскрашивании черно-белых фотографий / Жук Д.С., Азаров И.С. / Вестник науки. 2024, №6 (75), URL: https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestvo-ispolzovaniya-gan-v-raskrashivanii-cherno-belyh-fotografiy (дата обращения: 26.01.2025).

15. Afifi, M. et al. Histo*GAN*: Controlling Colors of *GAN*-Generated and Real Images via Color Histograms / Mahmoud Afifi, Marcus A. Brubaker, Michael S. Brown // Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV), 23 Nov 2020 (vol.1), pp.1-20, doi: 10.48550/arXiv.2011.11731.

16. Wang Y. et al. Pal*GAN*: Image colorization with palette generative adversarial networks / Wang, Y., Xia, M., Qi, L., Shao, J., & Qiao, Y. / European Conference on Computer Vision, Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, – P. 271-288. doi: 10.48550/arXiv.2210.11204.

17. Васильев, Е.П. Алгоритм оптимизации микроволновых переключателей методом Пауэлла / Е.П. Васильев, Д.Х. Нгуен / Современные технологии в науке и образовании (СТНО-2024): Сборник трудов VII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 04-06 марта 2024 года. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2024. – С. 6-12.

18. Ma, J. HDR-DANet: single HDR image reconstruction via dual attention / J. Ma, H. Zhang / Multimedia Systems, 2025, Vol. 31, No. 1. – P. 37. DOI 10.1007/s00530-024-01615-2.

19. Wu Y. et al. Towards vivid and diverse image colorization with generative color prior / Wu, Y., Wang, X., Li, Y., Zhang, H., Zhao, X., & Shan, Y / Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision, 2021. – P. 14377-14386. doi: 10.48550/arXiv.2108.08826.

20. Saxena, S. Comparison and analysis of image-to-image generative adversarial networks: a survey / Saxena S., Teli M.N. / arXiv preprint arXiv:2112.12625. – 2021, doi: 10.48550/arXiv.2112.12625.

21. Cheng C.W. et al. Continuous U-net: Faster, greater and noiseless / arXiv preprint arXiv:2302.00626, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2302.00626.

22. Sun B, Jia S, Jiang X, Jia F. Double *U-Net* Cycle*GAN* for 3D MR to CT image synthesis. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2023 Jan, 18(1). – P. 149-156., doi: 10.1007/s11548-022-02732-x.

23. Никин, В.В. Обзор методов и средств оценки качества кадров в видео-файле / В.В. Никин, С.В. Гарина / International Journal of Professional Science, 2020, № 11. – С. 56-63.

24. Эталонная объективная метрика оценки качества видео совместимая с PSNR учитывающая частотные и периферическую характеристики зрения человека / А.И. Можаева, И.В. Власюк, А.М. Поташников, Л. Стритер / DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов, 2021, Т. 11, № 2. – С. 44-54.

25. Керенцева, Н.Д. Аналитический обзор метрик, используемых для оценки качества мультимедийной информации / Н.Д. Керенцева, А.И. Трофимов / НБИ технологии, 2022. – Т. 16, № 3. – С. 27-31, DOI 10.15688/NBIT.jvolsu.2022.3.5.

26. Blinnikov, A.V. Features of the use of A generative adversarial network, including an *attention* mechanism in A hardware and software complex of digital technology support tools for processing images of archived Video content / A. V. Blinnikov, I. V. Kovalev/ Modern informatization problems in the technological and telecommunication systems analysis and synthesis MIP-2025'as: Proceedings of the XXX-th International Open Science Conference, Yelm, 09–10 января 2025 года, Yelm: Science Book Publishing House LLC, 2025. – P. 148-153.

27. Фаворская, М.Н. Восстановление аэрофотоснимков сверхвысокого разрешения с учетом семантических особенностей / М.Н. Фаворская, А.И. Пахирка // Информатика и автоматизация. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 1047-1076. – DOI 10.15622/ia.23.4.5.

28. Боровинский, Д.В. Создание видеоклипов с использованием цифровых преобразований и дискретных фильтраций / Блинников А.В., Тимашков А.В. / Актуальные вопросы развития науки и технологий: монография / Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2024. – С. 166-180.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.855.5.
EDN: ZPTSUK

РАЗРАБОТКА ОПТИМИЗИРОВАННОГО АНСАМБЛЕВОГО МЕТОДА ДЛЯ МУЛЬТИЗАДАЧНОЙ ДИАГНОСТИКИ ФИБРОЗА И СТЕАТОЗА ПЕЧЕНИ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПОЭТАПНЫЙ ПОДХОД

© Автор(ы) 2025
SPIN: 2321-3879
ORCID: 0009-0006-3530-5703

ПОПОВА Ольга Александровна, преподаватель
кафедры «Медицинской информатики и биологической физики»
Тюменский государственный медицинский университет
(625013, Россия, Тюмень, улица Одесская, 54, e-mail: PopovaOA@tyumsmu.ru)

SPIN: 9576-1114
AuthorID: 548158
ORCID: 0000-0001-9876-5471
ResearcherID: D-1001-2016
ScopusID: 24467903000

ХАМИТОВ Рустам Нуриманович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика»
Тюменский индустриальный университет
(625000, Россия, Тюмень, улица Володарского, 38, e-mail: apple_27@list.ru)

Аннотация. В статье представлен поэтапный подход к разработке оптимизированного ансамблевого алгоритма для мультизадачной классификации стадий фиброза и стеатоза печени. На первом этапе проведён сравнительный анализ пяти методов машинного обучения, где *Random Forest* показал наилучший баланс точности и устойчивости. Далее исследованы три метода ансамблирования: *Bagging, Boosting* и *Voting*. Метод *Voting* с мягким голосованием продемонстрировал наиболее стабильные результаты и был выбран в качестве основы для метамодели. Оптимизация выбранного метода включала динамическое взвешивание классификаторов, адаптивный конвейер предобработки с модифицированным *SMOTE* и мультизадачную архитектуру с раздельными конвейерами обработки. Предложенный алгоритм достиг высокого *F1-Score*, превзойдя базовые модели и другие ансамбли на 13,3%. Работа подчёркивает важность устойчивости к переобучению и интерпретируемости модели для медицинских приложений. Практическая значимость работы заключается в разработке высокоточного диагностического инструмента для одновременного анализа взаимосвязанных патологий. Перспективы дальнейших исследований включают интеграцию глубокого обучения и методов объяснимого ИИ для повышения точности и клинической применимости.

Ключевые слова: машинное обучение, ансамблевые методы, мультизадачная классификация, фиброз, стеатоз, методы ансамблирования, *Boosting-RF, Bagging-R*F, *Voting-RF.*

DEVELOPMENT OF AN OPTIMIZED ENSEMBLE METHOD FOR MULTITASKING DIAGNOSIS OF LIVER FIBROSIS AND STEATOSIS: COMPARATIVE ANALYSIS AND STEP-BY-STEP APPROACH

© The Autors 2025
POPOVA Olga Aleksandrovna, teacher of the department of «Medical informatics and biological physics»
Tyumen State Medical University
(625013, Russia, Tyumen, Odesskaya street, 54, e-mail: PopovaOA@tyumsmu.ru)
KHAMITOV Rustam Nurimanovich, doctor of technical sciences,
professor of the department of «Electric Power Engineering»,
Tyumen Industrial University
(38 Volodarskogo Street, Tyumen, 625000, Russia, e-mail: apple_27@list.ru)

Abstract. The article presents a step-by-step approach to the development of an optimized ensemble algorithm for multitasking classification of liver fibrosis and steatosis stages. At the first stage, a comparative analysis of five machine learning methods was carried out, where *Random Forest* showed the best balance of *accuracy* and stability. Next, three methods of ensemble are investigated: *Bagging, Boosting* and *Voting*. The *Voting* method with soft voting showed the most consistent results and was chosen as the basis for the meta-model. Optimization of the chosen method included dynamic classifier weighting, an adaptive preprocessing pipeline with a modified *SMOTE*, and a multitasking architecture with separate processing pipelines. The proposed algorithm achieved a high *F1-Score*, surpassing the base models and other ensembles by 13.3%. The work highlights the importance of resiliency to overfitting and model interpretability for medical applications. The practical significance of the work lies in the development of a high-precision diagnostic tool for the simultaneous analysis of interrelated pathologies. Prospects for further research include the integration of deep learning and explainable AI techniques to improve *accuracy* and clinical applicability.

Keywords: machine learning, ensemble methods, multitasking classification, fibrosis, steatosis, methods of ensembling, *Boosting-RF, Bagging-RF, Voting-RF.*

Для цитирования: *Попова О.А. Разработка оптимизированного ансамблевого метода для мультизадачной диагностики фиброза и стеатоза печени: сравнительный анализ и поэтапный подход / О.А. Попова, Р.Н. Хамитов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 41-54. – EDN: ZPTSUK.*

Введение. В настоящее время по данным Всемирной организации здравоохранения, примерно 30% мирового населения страдает от хронических заболеваний печени. Многие из этих пациентов могут не подозревать о наличии болезни, поскольку у них отсутствуют внешние симптомы. В Российской Федерации, согласно протоколу *DIREG2*, данное заболевание наблюдается у 37,3% населения, где 70,4% случаев приходится на долю стеатоза. Неалкогольная жировая болезнь печени (НАЖБП) представляет собой патологическое состояние, охватывающее широкий спектр изменений в печени, которые обусловлены накоплением жировых отложений в гепатоцитах (стеатоз), развитием в них воспаления (стеатогепатит) и перерождением клеток печени в фиброзную ткань (фиброз). Многие серьезные заболевания, такие как гепатит, цирроз, рак печени могут развиваться из НАЖБП, которую не всегда диагностируют на ранних стадиях. Данная ситуация подчеркивает важность применения регулярных медицинских обследований и диагностики, сбор обширного клинического анамнеза (включая анкетирование и социальный статус пациента) для накопления обширной базы данных по индивидуальному клиническому случаю (ИКС). Таким образом, комплексная диагностика становится ключевым аспектом для своевременного выявления заболевания печени.

Традиционные методы диагностики, включая биопсию и ультразвуковые исследования, обладают рядом ограничений, связанных с их инвазивностью, субъективностью интерпретации и недостаточной информативностью на начальных этапах заболевания. Это создает необходимость разработки новых неинвазивных подходов к диагностике, основанных на современных методах машинного обучения и искусственного интеллекта [1-3]. Современные СППВР (системы поддержки принятия врачебных решений) уже используют различные алгоритмы машинного обучения, включая методы опорных векторов и случайные леса, для классификации стадий заболеваний печени. Однако эти подходы имеют существенные ограничения: они не учитывают взаимосвязь между динамически связанными патологическими процессами, такими как фиброз и стеатоз, и не адаптированы для работы с комплексными клинико-медицинскими данными (ККМД), характеризующимися высокой размерностью, зашумленностью, ограниченным объемом выборки и дисбалансом классов. В ряде работ [4-6], посвящённых разработке (СППВР), показана целесообразность использования математических моделей, с помощью методики нечетких множеств для прогнозирования стадии заболевания печени, однако такие модели часто требуют ручной настройки правил, что снижает их гибкость и навсегда учитывают сложные взаимосвязи между разными патологиями. Глубокие нейронные сети, такие как *U-Net* и ансамбли сверточных сетей [7-9], показывают хорошие результаты в обработке медицинских изображений, но требуют больших объемов размеченных данных для обучения, что часто является проблемой в медицинских исследованиях. Существующие гибридные подходы [10, 11], комбинирующие различные алгоритмы машинного обучения, демонстрируют определенные преимущества, но не решают в полной мере проблему многозадачной классификации и не обладают универсальной адаптивностью для ККМД. Поэтому несмотря на множество работ, посвящённых разработке моделей машинного обучения для СППВР, проблема разработки адаптивных моделей под качественный состав ККМД остается актуальной.

Целью работы является разработка оптимизированного алгоритма для многозадачной классификации стадий фиброза и стеатоза печени, сочетающего методы ансамблирования и трансферного обучения. Основное внимание уделяется созданию адаптивной системы, способной эффективно работать с реальными клиническими данными, характеризующимися дисбалансом классов и ограниченным объемом.

В рамках исследования ставятся следующие задачи: изучение, анализ и тестирование существующих методов машинного обучения, создание адаптивного многозадачного классификатора на основе оптимизированного ансамбля моделей с механизмом динамического подбора весов.

Методология. *На первом этапе исследования* проводится изучение, комплексный анализ и тестирование существующих методов машинного обучения с целью выбора метода для построения базовой модели алгоритма ассамблирования. В качестве базовых моделей были выбраны и проанализированы методы машинного обучения: *Random Forest, Gradient Boosting, SVM* (*RBF kernel*), *Decision Tree, KNN.* Базовые алгоритмы были выбраны с учетом их способности обрабатывать многомерные данные с нелинейными зависимостями.

На втором этапе исследования выполняется изучение и тестирование способов ассамблирования, что позволит выбрать мета-модель для разработки оптимизированного алгоритма ассамблирования, основанного на мультизадачном обучении. Для изучения и анализа были выбраны наиболее популярные способы ассамблирования, подходящие под качественный состав ККМД: *Bagging, Boosting, Voting.* Выбор этих методов ас-

самблирования обоснован их способностью работать с небольшими и сложными наборами данных, а также их интерпретируемостью и устойчивостью к переобучению.

Третий этап исследования заключается в анализе и сборке ансамблевого алгоритма.

На четвертом этапе исследования реализуется оптимизация ансамблевого алгоритма посредством динамического подбора весов классификаторов на основе кросс-валидации и минимизации целевых метрик, разработка адаптивного конвейера предобработки данных с модифицированным *SMOTE* и автоматической стандартизацией, а также проектирование мультизадачной архитектуры с независимыми конвейерами обработки для параллельной классификации стадий фиброза и стеатоза.

На пятом этапе – реализация системы двойной валидации для повышения надежности модели.

Массив входных данных представлен реальным датасетом (реестр) медицинских данных по 104 пациентам. Клинические данные для исследования были предоставлены поликлиникой Тюменского государственного медицинского университета в обезличенном формате, что соответствует требованиям по работе с персональными данными. В датасете представлены анатомические и физиологические параметры пациентов, а также результаты биохимических и аппаратных методов исследования. Все пациенты прошли диагностику печени и имеют подтвержденный диагноз неалкогольной жировой болезни печени (НАЖБП). Реестр медицинских данных представлен в формате *Excel* (*.xlsx*) и включает 22 параметра: «*Sex*», «*Age*», «*Diagnosis*», «*F*», «*S*», «*Height*», «*Weight*», «*BMI*», «*Waist circumference*», «*Gamma glutamyl transferase* (*GGT*)», «*Triglycerides*», «*High density lipoprotein cholesterol*», «*Low-density lipoprotein cholesterol*», «*Alanine aminotransferase* (*ALT*)», «*Alkaline phosphatase*», «*Total protein*», «*Total cholesterol*», «*Aspartate aminotransferase* (*AST*)», «*Albumen*», «*Total bilirubin*», «*Glucose*», «*Platelets*». Из указанных параметров «*Sex*», «*Age*» и «*Diagnosis*» представлены в виде категориальных значений, в то время как остальные параметры представлены числовым типом данных. В контексте задач машинного обучения, для достижения высокой точности и надежности моделей крайне важна предварительная обработка входных данных. Предобработка ККМД проводилась с помощью встроенных инструментов *Microsoft Excel* и *open-source* библиотек машинного обучения на языке программирования *Python*. Из реестра ККМД были удалены дубликаты и малоинформативные данные, а также выявлены и исправлены аномальные значения. Для преобразования категориальных данных в числовые (векторизация) [12] использовался метод *OrdinalEncoder*. для нормализации данных был применен метод *MinMaxScaler*, для стандартизации данных – метод *StandartScaler* из библиотеки машинного обучения *Scikit-learn*.

Описание известных методов машинного обучения для построения базовых моделей ассамблирования. Случайный лес (*Random Forest, RF*) представляет собой ансамблевый алгоритм машинного обучения, основанный на построении множества деревьев решений [13]. В основе метода лежит комбинация бутстрэп-агрегирования (*bagging*) и случайного выбора признаков: каждое дерево обучается на уникальной подвыборке данных (размером *N*) и рассматривает случайное подмножество признаков при разделении узлов. Такой подход обеспечивает декорреляцию деревьев, повышая точность прогнозирования и снижая риск переобучения.

Ключевой особенностью *RF* является встроенный механизм оценки важности признаков через анализ *out-of-bag* (*OOB*) ошибок. Для каждого признака вычисляется среднее увеличение ошибки предсказания после его случайной перестановки в *OOB*-выборках, с последующей нормализацией по стандартному отклонению. Данная метрика позволяет количественно оценить вклад каждого признака в качество модели.

На первом этапе случайная подвыборка из обучающего набора данных для каждой модели (дерева) выбирается с помощью статистического метода – *bootstrap sampling*. В данной реализации некоторые экземпляры данных могут быть выбраны несколько раз, а некоторые могут не попасть в подвыборку вовсе. Если размер исходного набора данных равен *N*, то для каждого дерева создается подвыборка размером *N*.

D – это полный набор данных, подвыборка для *i*-го дерева D_i представлена формулой 1:

$$D_i = \{x_j | j \in random\ indices\ from\ [1, N]\}, \quad (1)$$

На втором этапе, при построении каждого дерева решений на каждом узле выбирается случайное подмножество признаков для определения наилучшего сплита. Если *p* – общее количество признаков, то на каждом узле случайным образом выбирается m_{split} признаков. Формулой 2 представлено количество признаков, выбираемых для каждого узла в задачах классификации, формулой 3 – в задачах регрессии.

$$m_{split} = \sqrt{m}, \quad (2)$$

$$m_{split} = \frac{m}{3}, \quad (3)$$

Это добавляет разнообразия в ансамбль и помогает избежать переобучения, поскольку каждый узел дерева принимает решения на основе различных наборов признаков. На третьем этапе для классификационных задач итоговое предсказание (*P*) для класса (*C*) модели формируется путем голосования всех деревьев. Где *T* – общее количество деревьев в лесу, итоговая классификация представлена формулой 4.

$$P = argmax_C \sum_{i=1}^{T} I(y_i = C), \quad (4)$$

Где I – это индикаторная функция, равная 1, если предсказание y_i дерева i равно классу C, и 0 в противном случае. Для регрессии итоговое предсказание P вычисляется как среднее предсказаний всех деревьев, представлено формулой 5.

$$P = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} y_i, \quad (5)$$

На следующем этапе идет расчет оценки важности признаков с помощью метода *Out-of-Bag* (*OOB*). Для каждого дерева, обученного на бутстрэп-подвыборке, выделяются те наблюдения, которые не были использованы для обучения, что формирует *OOB*-набор данных. Важность признака j вычисляется путем сравнения ошибки предсказания на *OOB*-наборе до и после случайного перемешивания значений представлено формулой 6.

$$Importance(j) = OOB_{error} - OOB_error_{permuted}, \quad (6)$$

Если перемешивание значений признака приводит к значительному увеличению ошибки, это указывает на высокую важность данного признака для модели.

Метод *k-Nearest Neighbour* (*KNN*) – это один из наиболее простых и интуитивно понятных алгоритмов машинного обучения, который находит широкое применение в задачах классификации и регрессии. Основная идея метода заключается в предположении, что объекты, расположенные близко друг к другу в пространстве признаков, обладают схожими характеристиками. Метод *KNN* основывается на вычислении расстояния между исследуемым объектом и его ближайшими соседями. Метод требует предварительного определения числа соседей k, а также выбора подходящей метрики для измерения расстояний между объектами в зависимости от их характеристик. В частности, для количественных данных применяются евклидова, манхэттенская и косинусная метрики, в то время как для категориальных данных рекомендуется использовать расстояние Хэмминга. Важно отметить, что выбор метрики существенно влияет на качество классификации и может быть адаптирован в зависимости от специфики задачи и структуры данных, что подчеркивает необходимость предварительного анализа данных перед применением метода *KNN*. Функция Эвклидового расстояния [14] приведена формулой 7.

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^{m}(x_{ik} - x_{jk})^2}, \quad (7)$$

Где x_{ik} и x_{jk} – это k элементы векторов x_i и x_j соответственно.

Таким образом объекту присваивается тот класс, значение меры близости которого больше.

Программная реализация метода *k-Nearest Neighbour* (в среде программирования *Python*) представлена классом *KNeighborsClassifier* из библиотеки машинного обучения *Scikit-learn* для задач классификации и классом *KNeighborsRegressor* для задач регрессии. Алгоритм *KNN* включает несколько ключевых этапов. Сначала подготавливаются тренировочные и тестовые данные. Затем определяется гиперпараметр k, который представляет собой количество соседей, используемых для принятия решения. Для каждого объекта тестовой выборки вычисляется расстояние до всех объектов тренировочной выборки, чаще всего с использованием евклидова расстояния, хотя возможны и другие метрики. После этого вычисленные расстояния сортируются, и выбираются k ближайших соседей. На этапе классификации класс определяется на основе большинства среди этих соседей, тогда как в случае регрессии вычисляется среднее значение целевой переменной, точность модели проверяется на тестовых данных. Алгоритм прост в реализации и часто используется для задач классификации и регрессии, когда данные имеют нелинейные зависимости.

Gradient Boosting – это метод машинного обучения, ключевая особенность которого заключается в последовательном обучении множества слабых моделей (обычно деревьев решений), где каждое новое дерево минимизирует ошибки предыдущих деревьев. Метод *Gradient Boosting* был разработан Джеромом Фридманом [15]. Данный метод можно рассматривать как метод оптимизации, который минимизирует некоторую функцию потерь $L(y, F(x))$ с помощью градиентного спуска. На каждой итерации вычисляется градиенты функции потерь, и новое дерево обучается на этих градиентах.

Алгоритм работы градиентного бустинга начинается с инициализации, где в качестве начального предсказания используется среднее значение целевой переменной для задач регрессии или логит для задач классификации. На каждом этапе итерации m вычисляются остатки текущих предсказаний, которые представляют собой разность между фактическими значениями целевой переменной и предсказаниями модели на предыдущей итерации. Эти остатки служат основой для обучения нового дерева решений, которое нацелено на минимизацию ошибок текущих предсказаний.

После обучения нового дерева осуществляется обновление предсказаний модели, где предсказания на итерации m определяются как сумма предсказаний на предыдущей итерации и произведения скорости обучения на предсказания нового дерева. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто заданное количество итераций или пока улучшение предсказаний не станет незначительным, представлено формулами 8 и 9.

$$r_i^{(m)} = y_i - F_{m-1}(x_i), \quad (8)$$

Где $F_{m-1}(x_i)$ – предсказание модели на итерации $m-1$,

$r_i(m)$ – остатки (ошибки) текущих предсказаний,

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + vT_m(x), \quad (9)$$

Где v – скорость обучения (*learning rate*).

В программной реализации *Gradient Boosting* использовалась библиотека *Scikit-Learn*, которая предоставляет реализацию класса *GradientBoostingRegressor* для задач регрессии и *GradientBoostingClassifier* для задач классификации.

Метод опорных векторов (*SVM, Support Vector Machine*) – это мощный инструмент машинного обучения, который используется для классификации и регрессии. Он работает путем нахождения гиперплоскости, которая наилучшим образом разделяет классы данных. Когда данные не линейно разделимы, *SVM* может применять ядровые функции, такие как радиальная базисная функция (*RBF*), для преобразования входных данных в более высокую размерность, где классы становятся линейно разделимыми. Основная идея *SVM* заключается в максимизации зазора (*margin*) между классами. Для линейно разделимых данных задача формулируется как минимизация нормы весового вектора *w* при условии, что все наблюдения классифицируются правильно, представлено формулами 10 и 11.

$$min_{w,b}\frac{1}{2} = \|w\|^2, \quad (10)$$

$$y_i(w^T x_i + b) \geq 1, \quad (11)$$

Где y_i – метка класса (принимающая значения +1 или -1),

x_i – входные данные.

Таким образом, *SVM* находит гиперплоскость, которая отделяет классы, соблюдая максимальный зазор между ними. Однако в реальных задачах данные часто не являются линейно разделимыми. Для обработки нелинейных данных используется функция ядра, которая позволяет проецировать данные в пространство более высокой размерности, где они могут стать линейно разделимыми. Ядро $K(x_i, x_j)$ связывает входные данные x_i и x_j с их проекциями $\phi(x_i)$ и $\phi(x_j)$, представлено формулами 12 и 13.

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)\varphi(x_j), \quad (12)$$

$$K(x_i, x_j) = e^{-\gamma}\| x_i - x_j\|^2, \quad (13)$$

Где γ – параметр, управляющий шириной гауссовой функции.

Ядро (радиально-базисная функция (*RBF*, например)) позволяет *SVM* эффективно обрабатывать данные, имеющие сложные, нелинейные границы разделения. Для оптимизации задачи *SVM* часто используется метод Лагранжа, что позволяет преобразовать задачу минимизации в задачу максимизации, представлено формулами 14, 15, 16.

$$max_\alpha(\sum_{i=1}^{n}\alpha_i - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\alpha_i\alpha_j\, y_i y_j K(x_i, x_j)), \quad (14)$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{n}\alpha_i y_i = 0, \quad (16)$$

Где *C* – параметр регуляризации, который контролирует баланс между максимизацией зазора и минимизацией ошибок классификации. Параметр *C* позволяет использовать мягкое разделение, что особенно полезно в случаях, когда данные содержат шум или выбросы. Программная реализация алгоритма *SVM* с ядром *RBF* реализована с помощью библиотки *Scikit-Learn*, через класс *SVC* из модуля *sklearn.svm*. Создан объект *SVC* с заданными параметрами: *C*=1.0 (регуляризация), *kernel='rbf'* (ядро *RBF*), *gamma='scale'* (коэффициент ядра) и *random_state*=42 (*seed* для воспроизводимости результатов).

Метод *Decision Tree* (деревья решений) представляют собой непараметрический метод обучения с учителем, применяемый для задач классификации и регрессии [16]. Алгоритм строит древовидную модель, где внутренние узлы соответствуют признакам, ветви – условиям разбиения, а терминальные узлы – прогнозируемым значениям. Процесс построения осуществляется через рекурсивное бинарное разбиение пространства признаков, оптимизирующее выбранный критерий (энтропия, индекс Джини или информационный прирост). Рекурсия прекращается при достижении условий останова: полной однородности узла, минимального размера подвыборки или заданной глубины дерева. Формально критерии разделения выражаются через энтропию (представлено формулой 17), информационный прирост (предсавлено формулой 18) и индекс Джини (представлено формулой 19), обеспечивая статистически обоснованный выбор точек разбиения.

$$H(S) = -\sum_{i=1}^{c} p_i log_2(p_i), \quad (17)$$

Где p_i – вероятность принадлежности элемента к классу *i*, а *c* – общее количество классов.

$$IG(A) = H(S) - \sum_{v \in Values(A)} \frac{|S_v|}{|S|} H(S_v), \quad (18)$$

$$G(S) = 1 - \sum_{i=1}^{c} p_i^2, \quad (19)$$

Где *Values*(*A*) – множество возможных значений атрибута *A*,

|*S*| – размер всего множества данных,

|*Sv*| – размер подмножества данных, соответствующих значению *v*.

Программное решение метода *Decision Tree* реализовано с помощью библиотеки машинного обучения *scikit-learn*, методом *train_test_split* для разделения данных на обучающую и тестовую выборки. Затем создается объект *DecisionTreeClassifier*, который обучается на подготовленной обучающей выборке.

Описание известных методов машинного обучения для построения мета-моделей (способы ансамблирования). Bagging – это метод ансамблевого обучения, который использует технику бутстрэппинга (многократная повторная выборка из исходного набора данных с возвращением) для создания нескольких B подвыборок из обучающего набора данных, с последующим обучением отдельных моделей на этих подвыборках [17]. Результаты моделей объединяются для получения

окончательного предсказания. В результате каждая подвыборка может содержать дублирующиеся экземпляры из оригинального набора данных, в то время как некоторые экземпляры могут быть пропущены. Для каждой подвыборки D_b (где b=1,2,…, B) обучается отдельная модель M_b, которая может представлять собой, например, дерево решений, случайный лес или любую другую модель машинного обучения. После обучения моделей происходит объединение результатов: для задач регрессии результаты усредняются, и итоговое предсказание представлено формулой 20. В случае задач классификации используется голосование (*majority voting*), при котором класс, получивший наибольшее количество голосов от всех моделей, становится окончательным предсказанием. Из-за усреднения предсказаний нескольких моделей, дисперсия уменьшается, что приводит более точным и стабильным предсказаниям. Дисперсия предсказаний представлена формулой 21.

$$\hat{y} = \frac{1}{B}\sum_{b=1}^{B} M_b(x), \quad (20)$$

$$Var(\hat{Y}) = Var(E[\hat{Y}]) + E[Var(\hat{Y})], \quad (21)$$

Где Y – истинное значение,

$\hat{Y}$ – предсказание,

$Var(\hat{Y})$ –дисперсия предсказаний.

Программная реализация метода *Bagging* выполнена с использованием библиотеки *scikit-learn*, где в качестве базового классификатора применено дерево решений. На первом этапе формируется экземпляр *BaggingClassifier*, где задаются базовый классификатор, количество моделей в ансамбле (параметр *n_estimatorsn_estimators*) и параметры бутстрэпинга. После чего производится обучение *Bagging* классификатора на обучающей выборке, что позволяет модели адаптироваться к данным. После завершения обучения применяем обученную модель для предсказания классов на тестовой выборке.

Boosting – это метод ансамблевого обучения, который нацелен на улучшение точности модели путем комбинирования слабых моделей (обычно, решающих деревьев) в одну сильную модель. В методе *Boosting* реализуется последовательное обучение модели, при этом каждая последующая модель фокусируется на ошибках предыдущих [18]. Алгоритм *Boosting* представляет собой итеративный процесс, направленный на создание сильной модели путем последовательного обучения множества слабых моделей. В начале алгоритма устанавливаются начальные веса для каждого примера в обучающей выборке, при этом веса обычно инициализируются одинаково. На первом этапе происходит обучение слабой модели на текущем наборе данных с учетом заданных весов. После завершения обучения слабой модели осуществляется оценка ее ошибок: вычисляются неправильно классифицированные объекты, и на их основе обновляются веса. Объекты, которые были неправильно классифицированы, получают больший вес, что заставляет последующие модели уделять им больше внимания. Затем новая модель добавляется к ансамблю с определенным весом, который зависит от ее точности, что позволяет более точным моделям вносить больший вклад в финальный результат. Данный процесс повторяется несколько раз, пока не будет достигнуто заданное количество итераций или желаемая точность.

В результате финальная модель формируется как взвешенная сумма всех слабых моделей, обеспечивая устойчивость к переобучению и повышает точность классификации.

$$P(h(x) = y) > 0{,}5$$

Где, $h(x)$ – слабая модель,

y – истинный класс объекта x,

0,5 – вероятность правильной классификации объекта выше 50%.

В начале работы алгоритм строит ансамбль из T слабых моделей (h_1, h_2… h_T), обучая каждую последующую модель на основе ошибок предыдущих. Первая модель обучается на исходных данных с равными весами, представлено формулой 22. На каждой следующей итерации t вычисляются ошибки предыдущей модели, представлено формулой 23.

$$w_i^{(1)} = \frac{1}{N}, \forall_i, \quad (22)$$

Где N – количество объектов,

$$\epsilon_t = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i^{(t)} I(h_{t-1}(x_i) \neq y_i)}{\sum_{i=1}^{N} w_i^{(t)}}, \quad (23)$$

Где I – индикаторная функция, равная 1, если предсказание неверно, и 0 – если верно,

$w_i(t)$ – вес i-го объекта на итерации.

Обновление весов объектов и формирование финальной функции показано формулами 24-26.

$$w_i^{t+1} = w_i^{(t)} \exp(\alpha_t I(h_t(x_i) \neq y_i)) \quad (24)$$

$$\alpha_t = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1-\epsilon_t}{\epsilon_t}\right) \quad (25)$$

$$H(x) = \sum_{t=1}^{T} \alpha_t h_t(x), \quad (26)$$

Где α_i – вес новой модели, зависящий от её точности,

$H(x)$ – итоговая предсказательная функция.

Программная реализация метода *Boosting* представлена библиотекой *scikit-learn* в классе *GradientBoostingClassifier* (или *AdaBoostClassifier*). Для использования необходимо импортировать библиотеки и создать экземпляр *GradientBoostingClassifier*, задав параметры: количество моделей (*n_estimators*), скорость обучения (*learning_rate*) и максимальную глубину деревьев (*max_depth*). Модель обучается на обучающей выборке с помощью метода *fit*, после чего используется для предсказания классов на тестовой выборке.

Метод *Voting* представляет собой ансамблевый подход, объединяющий предсказания множества базовых моделей для повышения точности

классификации или регрессии [19]. Алгоритм предполагает обучение разнородных моделей (деревья решений, *SVM*, логистическая регрессия) на общем наборе данных с последующей агрегацией их предсказаний. В задачах классификации применяется жесткое голосование (выбор класса по большинству) или мягкое голосование (усреднение вероятностей классов). Для регрессии используется усреднение или медианное значение предсказаний. Математическая формализация метода представлена формулами 27-29.

$$y_i \in \{C_1, C_2 \dots, C_k\}, \quad (27)$$

$$y_{vote} = argmax_{C_j} \sum_{i=1}^{N} I(y_i = C_j), \quad (28)$$

$$y_{vote} = argmax_{C_j} \sum_{i=1}^{N} w_i P(y_i = C_j), \quad (29)$$

Где C_1, C_2,…C_k – классы,

y_i – предсказание для данного объекта,

I – индикаторная функция,

wi – вес i-го классификатора,

$P(y_i=C_j)$ – вероятность предсказания классификатором i класса C_j.

Программная реализация метода *Voting* реализована в классе *VotingClassifier* библиотеки *scikit-learn*. Для создания ансамбля требуется несколько базовых моделей, которые передаются в экземпляр *VotingClassifier*. При этом задается тип голосования: *hard* для выбора класса по большинству голосов или *soft* (в работе использовался данный метод) для усреднения вероятностей. Затем ансамбль обучается на обучающей выборке с помощью метода *fit*, после чего используется для предсказания классов на тестовой выборке.

Описание разработанного оптимизированного ансамблевого метода для мультизадачной диагностики фиброза и стеатоза печени. Разработанный метод *Opt-Voting-FKS* представляет собой усовершенствованный ансамблевый классификатор, специально адаптированный для одновременного решения задач диагностики стеатоза (*S*) и фиброза (*F*) печени. В состав ансамбля входят пять разнородных алгоритмов машинного обучения, включающие три древовидные модели (ограниченные по глубине *Decision Tree, Random Forest* и *Extra Trees*) и две с другой логикой подхода (*SVC* с *RBF*-ядром и *KNN*), что обеспечивает комплексный анализ медицинских данных за счет сочетания различных математических парадигм. Ключевой особенностью метода является реализация адаптивного механизма взвешивания, где влияние каждого классификатора в ансамбле динамически оптимизируется с использованием продвинутой техники последовательных квадратичных программ (*SLSQP*) на основе 5-кратной стратифицированной кросс-валидации. Данный подход учитывает не только итоговые предсказания моделей, но и их вероятностные оценки (*predict_proba*), что существенно повышает точность агрегирования результатов. Оптимизация направлена на максимизацию *F1*-меры – критически важного показателя для медицинских диагностических систем. Для работы с характерным для медицинских данных дисбалансом классов реализована интеллектуальная двухэтапная система предобработки. На первом этапе происходит автоматическая фильтрация экстремально редких классов (менее 5 образцов), что исключает возникновение статистически незначимых закономерностей. На втором этапе применяется модифицированный алгоритм *SMOTE* с увеличенным до 3 значением *k_neighbors* и стратегией "*not majority*", что обеспечивает сбалансированное представление классов без риска генерации шумовых синтетических примеров. В случаях, когда применение *SMOTE* становится невозможным, система автоматически переключается на стандартное масштабирование признаков, гарантируя работоспособность метода в любых условиях. Особое внимание уделено процедуре валидации, где реализован механизм двойной стратификации, учитывающий распределение как по меткам фиброза, так и по меткам стеатоза одновременно. Это обеспечивает репрезентативность обучающих и тестовых подвыборок для обеих диагностических задач. Размер тестовой выборки увеличен до 30%, что повышает достоверность оценки обобщающей способности модели. Все базовые алгоритмы в ансамбле подвергнуты тщательной регуляризации: глубина деревьев ограничена тремя уровнями, для *SVC* снижена сила регуляризации (C=0.5), в *KNN* увеличено количество учитываемых соседей до 5 с взвешиванием по расстоянию. Эти меры направлены на предотвращение переобучения и обеспечение устойчивости модели при работе с ограниченными медицинскими данными. Техническая реализация метода выполнена в виде модульного *Python*-конвейера, включающего функции для безопасной обработки дисбаланса (*safe_resample*), оптимизации весов (*optimize_weights_cv*) и специализированного класса *OptimizedVotingClassifier*. Система оценки качества интегрирует традиционные метрики (*Accuracy, Recall, Precision*) с расчетом среднеквадратичной ошибки (*MSE*) и анализом устойчивости через кросс-валидацию.

Научная новизна метода *Opt-Voting-FKS* заключается в реализации динамической оптимизации весов базовых классификаторов, основанной на сочетании кросс-валидационной оценки и численной минимизации целевой метрики качества. Данный подход обеспечивает интеллектуальное взвешивание моделей с автоматической адаптацией к специфике конкретного медицинского набора данных. Важным отличием от существующих подходов является архитектура двойной валидации, которая объединяет внутреннюю кросс-валидацию в процессе оптимизации весов с внешней независимой оценкой качества модели, что значительно повышает надежность прогнозов и снижает риск

переобучения. Метод вносит значимый вклад в обработку медицинских данных благодаря уникальному механизму работы с дисбалансом классов. Система автоматически выбирает между модифицированным алгоритмом *SMOTE* и стандартной стандартизацией в зависимости от возможности синтетической генерации данных, демонстрируя устойчивую работу даже при крайне ограниченной выборке по отдельным классам. Особого внимания заслуживает способность метода параллельно решать задачи классификации стадий фиброза и стеатоза через раздельные конвейеры предобработки при сохранении общего пространства признаков, что обеспечивает учет специфики каждой патологии и повышает точность диагностики.

Практическая значимость исследования обусловлена разработанным комплексом решений, включающим механизм интерпретации результатов на основе анализа оптимизированных весов, систему обработки ошибок и фильтрации редких классов. Эти особенности делают метод особенно ценным для клинической практики, где критически важны как высокая точность классификации, так и прозрачность принимаемых решений.

Пусть задана выборка данных:

$D=\{(x_i, y_i^S, y_i^F)\}i=1^N$,

где:

$x_i \in Rd$ – вектор медицинских признаков пациента,

$y_i^S \in \{0, 1, ..., K_S\}$ – степень стеатоза,

$y_i^F \in \{0, 1, ..., K_F\}$ – степень фиброза.

Определение функции потерь и целевой задачи оптимизации: модель *M*, минимизирующая:

$$L = \alpha L_S + (1-\alpha) L_F,$$

где L_S, L_F – функции потерь для задач *S* и *F*, $\alpha \in [0,1]$ – гиперпараметр баланса.

Проводится предварительная обработка данных, удаляются классы с числом образцов $< n_{min}$

$$C_{rare} = \{k \mid \sum_{i=1}^{N} II(y_i^t = k) < n_{min}, t \in \{S, F\}\},$$

Проводится балансировка *SMOTE*, для миноритарных классов генерируются синтетические образцы:

$$x_{new} = x_i + \lambda(x_{zi} - x_i),$$

$$\lambda \sim U(0,1)$$

Где x_{zi} – ближайший сосед из класса y_i^t , с параметрами: *kneighbors*=1, *sampling_strategy='not minority'*

Стандартизация:

$$x' = \frac{x-\mu}{\sigma},$$

Где *x* – исходное значение признака,

μ – среднее значение признака в обучающей выборке,

σ – стандартное отклонение признака в обучающей выборке,

x' – стандартизированное значение.

Гибридный ансамбль *Voting-RF* и взвешенное голосование с базовыми классификаторами:

$$H = \{h_j\}_{j=1}^{M},$$

$$h_j \in \{DecisionTree, RandomForest, ExtraTrees, SVM, k-NN\}$$

Взвешенное голосование:

$$\hat{y}^t = argmax_{k \in C^t} \sum_{j=1}^{M} w_j^t P_j^t(k \mid x),$$

где $P_j^t(k/x)$ – вероятность класса *k* модели h_j,

$\hat{y}^t$ – предсказанный класс для задачи *t*,

C^t – множество возможных классов для задачи *t* (например, {0, 1, 2, 3} для стадий фиброза),

M – количество моделей в ансамбле,

w_j^t – вес *j*-й модели для задачи *t* (оптимизируется методом *SLSQP*),

$P_j^t(k/x)$ – вероятность принадлежности вектора *x* к классу *k*, предсказанная моделью h_j.

Оптимизация весов ансамбля: $w^t=(w_1^t, ..., w_M^t)$

$$\min_w \sum_{i=1}^{N} l(y_i^t, \sum_{j=1}^{M} w_i P_j^t(*|x_i)) + \lambda \|w\|_2^2$$

при ограничениях:

$w_j \geq 0$,

$$\sum_{j=1}^{M} w_j = 1,$$

где:

l – функция потерь (кросс-энтропия),

λ – коэффициент регуляризации (в коде явно не задан, но метод *SLSQP* учитывает ограничения),

$P_j^t(k/x)$ – вероятность класса *k*, предсказанная моделью h_j для образца x_i.

Алгоритм:

Вычисление вероятностей P_j^t на кросс-валидации

Решение методом *SLSQP* с метрикой *F1-score*:

$$F1 = 2\frac{Precision + Recall}{Precision \cdot Recall}$$

Мультизадачное обучение:

Раздельное обучение ансамбей с согласованным препроцессингом (индивидуальной балансировкой классов для каждой задачи) и индивидуальной оптимизацией весов:

M_S обучается на $\{(x_i, y_i^S)\}$,

M_F обучается на $\{(x_i, y_i^F)\}$.

Качество оценивается по средневзвешенным метрикам:

$$F1_{total} = \beta F1_S + (1-\beta) F1_F,$$

$\beta \in [0, 1]$

где:

$F1_S$ – *F1-score* для задачи классификации стеатоза,

$F1_F$ – *F1-score* для задачи классификации фиброза,

β – гиперпараметр, определяющий важность задачи стеатоза относительно фиброза:

β=1 – Учитывается только качество предсказания стеатоза.

β=0 – Учитывается только качество предсказания фиброза.

β=0.5 – Обе задачи равнозначны.

Расчет *F1-score* для каждой задачи $t \in \{S, F\}$ *F1-score* вычисляется как взвешенное среднее

$$F1_t = \sum_{k \in C^t} (\frac{n_k}{N} \cdot F1_t^k),$$

где:

C^t – множество классов задачи *t*,

n_k – количество образцов класса k,
N – общее число образцов,
$F1_t^k$ – *F1-score* для класса k в задаче t:

$$F1_t^k = 2\frac{Precision_t^k \cdot Recall_t^k}{Precision_t^k + Recall_t^k}$$

Результаты. *Описание результатов работы 5 известных методов машинного обучения для выбора базовой модели.* В рамках задачи мультизадачного обучения, где целевыми переменными являются предсказание степени развития фиброза (*F*) и стеатоза (*S*), были проанализированы результаты пяти базовых моделей машинного обучения: *Random Forest, Gradient Boosting*, *SVM* (*RBF kernel*), *Decision Tree, KNN*. Целью анализа был выбор наиболее подходящей базовой модели для имеющихся медицинских данных. Метрики оценки включали *Accuracy, Recall, F1 Score, Precision* и *Mean Squared Error* (*MSE*).

Для оценки степени выраженности фиброза (СВФ) модель *Random Forest* достигла высоких показателей: *Accuracy* = 0.952, *Recall* = 0.944, *F1 Score* = 0.903, *Precision* = 0.888, *MSE* = 0.191, демонстрируя точную классификацию с минимальной ошибкой. Для степени выраженности стеатоза (СВС) производительность модели снизилась: *Accuracy* = 0.762, *Recall* = 0.6, *F1 Score* = 0.575, *Precision* = 0.674, *MSE* = 0.381. Несмотря на снижение, модель сохранила приемлемые показатели, что делает её пригодной для задачи мультизадачного обучения.

Метод *Gradient Boosting* показал идеальные результаты для СВФ: *Accuracy* = 1, *Recall* = 1, *F1 Score* = 1, *Precision* = 1, *MSE* = 0. Для СВС модель также продемонстрировала идеальные результаты: *Accuracy* = 1, *Recall* = 1, *F1 Score* = 1, *Precision* = 1, *MSE* = 0. Однако такие результаты могут быть следствием переобучения, особенно если данные содержат шум или выбросы.

Метод *SVM* (*RBF Kernel*) показал низкую эффективность для СВФ: *Accuracy* = 0.619, *Recall* = 0.333, *F1 Score* = 0.255, *Precision* = 0.206, *MSE* = 4.952. Для СВС производительность модели ухудшилась до нулевых значений: *Accuracy* = 0, *Recall* = 0, *F1 Score* = 0, *Precision* = 0, *MSE* = 6. Это свидетельствует о том, что метод *SVM* (*RBF Kernel*) плохо подходит для решения задачи мультизадачного обучения.

Метод *Decision Tree* показал идеальные результаты для СВФ: *Accuracy* = 1, *Recall* = 1, *F1 Score* = 1, *Precision* = 1, *MSE* = 0. Для СВС модель также продемонстрировала идеальные результаты: *Accuracy* = 1, *Recall* = 1, *F1 Score* = 1, *Precision* = 1, *MSE* = 0. Как и в случае с *Gradient Boosting*, такие результаты могут быть следствием переобучения, что снижает практическую применимость данной модели.

Метод *KNN* показал низкую эффективность для СВФ: *Accuracy* = 0.571, *Recall* = 0.308, *F1 Score* = 0.258, *Precision* = 0.222, *MSE* = 4.571. Для СВС производительность модели ухудшилась до нулевых значений: *Accuracy* = 0, *Recall* = 0, *F1 Score* = 0, *Precision* = 0, *MSE* = 5.667. Таким образом, метод *KNN* оказался неэффективным для решения задачи мультизадачного обучения.

Метод *Random Forest* показал высокие значения *Accuracy* (0.952), *Recall* (0.944), *F1 Score* (0.903) и *Precision* (0.888) для СВФ, что свидетельствует о его способности хорошо классифицировать данные, связанные с фиброзом. Хотя производительность модели снизилась для задачи СВС, она сохранила приемлемые значения *Accuracy* (0.762) и *Recall* (0.6), что делает её пригодной для задачи мультизадачного обучения. В отличие от *Gradient Boosting* и *Decision Tree*, метод *Random Forest* не демонстрирует идеальных результатов, что снижает риск переобучения и повышает его пригодность для обобщения на новых данных. *MSE* для СВФ составил 0.191, а для стеатоза – 0.381, что указывает на высокую точность предсказаний. Метод *Random Forest* демонстрирует сбалансированные результаты для обеих целевых переменных, что важно для задачи мультизадачного обучения.

Таким образом, метод *Random Forest* является наиболее предпочтительным выбором для построения базовой модели при работе с медицинскими данными небольшого объема. Результаты работы методов *Random Forest*, *Gradient Boosting*, *SVM* (*RBF kernel*), *Decision Tree*, *KNN* представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка эффективности базовых моделей

Метод базовой модели	*Accuracy*	*Recall*	*F1 Score*	*Precision*	*MSE*
Random Forest (F)	0.952	0.944	0.903	0.888	0.191
Gradient Boosting (F)	1	1	1	1	0
SVM (RBF Kernel) (F)	0.619	0.333	0.255	0.206	4.952
Decision Tree (F)	1	1	1	1	0
KNN (F)	0.571	0.308	0.258	0.222	4.571
Random Forest (S)	0.762	0.6	0.575	0.674	0.381
Gradient Boosting (S)	1	1	1	1	0
SVM (RBF Kernel) (S)	0	0	0	0	6
Decision Tree (S)	1	1	1	1	0
KNN (S)	0	0	0	0	5.667

Описание результатов работы известных методов машинного обучения для выбора мета-модели (способ ансамблирования). В результате исследования были проанализированы результаты работы трех известных способов ансамблирования (*Bagging, Boosting, Voting*) с целью выбора мета-модели ансамблирования для мультизадачной классификации степени развития фиброза (*F*) и стеатоза (*S*) печени. В качестве метрик оценки использовались правильность (*Accuracy*), полнота (*Recall*), *F1*-мера (*F1 Score*), точность (*Precision*) и среднеквадратичная ошибка (*MSE*). В качестве основной базовой модели для работы с имеющимися медицинскими данными небольшого объема был использован, ранее выбранный метод *Random Forest (RF).* Таким образом, для тестирования концепции ансамблевой модели были реализованы следующие методы: *Bagging-RF (багинг-баггинг), Boosting-RF (бустинг-баггин), Voting-RF (вотинг-баггинг).*

Целевые переменные были разделены на обучающую (0,8) и тестовую (0,2) выборки с использованием функции *train_test_split* с параметром *test_size*=0.2 и фиксированным состоянием *random_state*=42. Для сравнения производительности методов эмпирическим путем было выбрано оптимальное количество деревьев и глубина -25. Так как свыше 25 деревьев значение качества модели никак не улучшалось, а при выборе меньшего числа – резко ухудшалось.

Модель *Bagging-RF* на основе *BaggingClassifier* с *RandomForestClassifier* в качестве базового классификатора (25 деревьев, глубина 5) показала высокую эффективность: для СВФ *Accuracy*=0.952, *F1*=0.931; для СВС *Accuracy*=0.809, *F1*=0.846. Так как ключевой особенностью данного подхода является обучение однотипных моделей на различных подвыборках исходных данных (способствует снижению дисперсии прогноза), то для соответствия логике работы мета-модели был использован однотипный *RandomForestClassifier.* Кросс-валидация подтвердила устойчивость (*F1*: 0.970±0.026 для СВФ, 0.816±0.043 для СВС). Хотя модель демонстрирует хорошие результаты для отдельных задач, но архитектурные её ограничения (однотипность классификаторов, отсутствие адаптации к разнородным данным) снижают эффективность при мультизадачной классификации.

Модель *Boosting-RF* построеная с применением *GradientBoostingClassifier* имеет следующие параметры: 25 деревьев максимальной глубиной 5, коэффициент обучения 0.8, определяющий шаг градиентного спуска. Характерной чертой бустинг подхода является последовательное обучение ансамбля, при котором каждая следующая модель корректирует ошибки предыдущих, что позволяет эффективно уменьшать смещение. Соответственно для работы мета-модели был использован также однотипный *RandomForestClassifier.* По результатам работы *м*етод *Boosting-RF* достиг идеальных показателей (*accuracy*=1.000, *F1*=1.000) с нулевым стандартным отклонением при кросс-валидации для задачи СВФ и СВС. Такой результат может указывать на потенциальное переобучение модели.

Для реализации *Voting-FKS (Forest+KNN+SVC)* использована гетерогенная комбинация пяти классификаторов: трех древовидных моделей (*DecisionTreeClassifier, RandomForestClassifier, ExtraTreesClassifier*) для работы с нелинейными зависимостями, а также двух дополнительных алгоритмов с иной логикой (*SVC* с *RBF*-ядром и *KNeighborsClassifier*). Так как метод *Voting* основан на независимом обучении базовых моделей с последующим агрегированием их предсказаний через голосование, ключевым требованием является обеспечение разнообразия смещений (*bias*) в ансамбле. Таким образом был обусловлен выбор гетерогенной структуры классификаторов, позволяющей охватить более широкий спектр гипотез о данных. По результатам работы метод *Voting-FKS* показал сбалансированную производительность: для задачи СВФ – *accuracy*=0.857 и *F1*=0.834, для задачи СВС – *accuracy*=0.952 и *F1*=0.953. Средние значения *F1*-меры при кросс-валидации составили 0.964 (*F*) и 0.977 (*S*) со стандартными отклонениями 0.026 и 0.016 что подтверждает высокую стабильность метода и говорит о его хорошей обобщающей способности.

Анализ метрик *precision* и *recall* показал, что все модели демонстрируют высокую согласованность между этими показателями, с преимуществом метода *Voting-RF.* Значения *MSE* находятся в диапазоне от 0.000 (метод *Boosting*) до 0.285 (метод *Voting-FKS*), подтверждая общую высокую точность классификации. Результаты работы методов *Bagging-RF, Boosting-RF, Voting-FKS* представлены в таблице 2.

Несмотря на доказанную эффективность гетерогенного ансамбля *Voting-FKS* в мультизадачной классификации фиброза и стеатоза печени, анализ результатов выявил ряд существенных ограничений, требующих методического усовершенствования. Основной проблемой текущей реализации является использование равномерного распределения весов для всех базовых классификаторов, что не учитывает их дифференцированную эффективность при решении различных диагностических задач. Экспериментальные данные свидетельствуют о существенной вариабельности качества предсказаний: древовидные алгоритмы демонстрируют лучшую производительность при классификации стеатоза, тогда как метод опорных векторов с *RBF*-ядром показывает более высокую точность в задачах выявления фиброза. Особую актуальность эта проблема приобретает в контексте мультизадачной классификации, где требуется адаптивное комбинирование разнородных моделей с учетом специфики каждой диагностической подзадачи.

Для преодоления указанных ограничений предлагается комплексная модернизация метода, включающая внедрение механизма динамического взвеши-

вания на основе оптимизации последовательными квадратичными программами (*SLSQP*). Такой подход позволит автоматически регулировать вклад каждого классификатора, минимизируя целевую функцию по *F1*-мере для обеих диагностических задач одновременно.

Не менее важным направлением совершенствования является разработка адаптивной системы обработки дисбаланса классов, которая должна включать предварительную фильтрацию редких классов (при *n_samples* < 5) с последующим применением модифицированного алгоритма *SMOTE* с оптимизированными параметрами. Особое внимание стоит уделить реализации механизма автоматического перехода к стандартному масштабированию в случаях, когда применение методов синтетической балансировки данных оказывается невозможным или нецелесообразным.

Ключевым элементом модернизации должно стать усовершенствование стратегии валидации за счет внедрения механизма двойной стратификации по меткам фиброза и стеатоза. Такой подход обеспечит репрезентативное распределение классов в обучающих и тестовых подвыборках, что особенно важно для медицинских данных со сложной структурой взаимосвязей.

Таблица 2 – Оценка эффективности гибридных ансамблевых мета-моделей

Метод	*Accuracy*	Recall	F1 Score	Precision	MSE	CV F1 Mean	CV F1 Std
Bagging-RF(F)	0.952	0.952	0.931	0.916	0.190	0.970	0.026
Bagging-RF(S)	0.809	0.809	0.783	0.798	0.190	0.816	0.043
Boosting-RF(F)	1	1	1	1	0	1	0
Boosting-RF (S)	1	1	1	1	0	1	0
Voting-FKS (F)	0.857	0.857	0.834	0.813	0.285	0.964	0.026
Voting-FKS(S)	0.952	0.952	0.953	0.960	0.047	0.977	0.016

Сравнение результатов работы оптимизированного ансамблевого метода Opt-Voting-KFS с контрольными результатами не оптимизированного ансамблевого метода Voting- FKS. Результаты экспериментального исследования демонстрируют существенные различия в эффективности базового и оптимизированного метода *Voting-FKS* при решении мультизадачной классификации степени фиброза (*F*) и стеатоза (*S*) печени. Наиболее значительное улучшение показателей наблюдается для задачи диагностики фиброза, где оптимизированная версия метода продемонстрировала увеличение *accuracy* на 12.8 % (с 0.857 до 0.967) и рост *F1*-меры на 15.9% (с 0.834 до 0.967). Особенно отмечается снижение среднеквадратичной ошибки на 88.4% (с 0.285 до 0.033), что свидетельствует о существенном повышении точности предсказаний. Устойчивость модели также значительно улучшилась, о чем свидетельствует увеличение среднего значения *F1*-меры при кросс-валидации с 0.964 до 0.993 при одновременном снижении стандартного отклонения с 0.026 до 0.014.

Для задачи классификации стеатоза оптимизированный метод показал незначительное снижение *accuracy* на 2 % (с 0.952 до 0.933) и уменьшение *F1*-меры на 2.2 % (с 0.953 до 0.932). Среднеквадратичная ошибка увеличилась на 40.4% (с 0.047 до 0.066), что, однако, следует рассматривать в контексте изначально высоких показателей базового метода. Определенно, что несмотря на некоторое снижение основных метрик, оптимизированная версия продемонстрировала улучшение обобщающей способности, выразившееся в увеличении среднего значения *F1*-меры при кросс-валидации с 0.977 до 0.982, хотя стандартное отклонение при этом незначительно возросло с 0.016 до 0.022.

Полученные результаты позволяют сделать несколько важных выводов относительно эффективности проведенной оптимизации. Во-первых, метод продемонстрировал наибольшую эффективность для более сложной задачи классификации фиброза, где исходные показатели были относительно низкими. Это может быть связано с тем, что оптимизация весов позволила лучше учесть вклад отдельных классификаторов, особенно эффективных для данной задачи. Во-вторых, для задачи стеатоза, где базовый метод уже показывал высокие результаты, оптимизация привела к незначительному снижению основных метрик, что может объясняться достижением предела эффективности для данной задачи или необходимостью компромисса между двумя решаемыми задачами. Однако улучшение показателей кросс-валидации свидетельствует о повышении устойчивости модели даже в этом случае.

Разница в эффективности оптимизации для двух задач может быть обусловлена несколькими факторами. Во-первых, задачи классификации фиброза и стеатоза имеют различную природу и сложность, что отражается в изначальных показателях базового метода. Во-вторых, распределение классов в исходных данных для этих задач существенно различается, что влияет на эффективность методов обработки дисбаланса. В-третьих, различные базовые классификаторы могут демонстрировать разную относительную эффективность для каждой из задач. Важно отметить, что несмотря на незначительное снижение показателей для задачи стеатоза, общий баланс эффективности следует считать положитель-

ным, учитывая существенное улучшение результатов для клинически более значимой задачи классификации фиброза.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения оптимизированного метода *Voting-FKS* для комплексной диагностики патологий печени.

В таблице 3 представлены результаты сравнения оценки эффективности моделей оптимизированного ансамблевого метода *Opt-Voting-KFS* и контрольного (неоптимизированного) метода *Voting-KFS*.

Оптимизированная версия *Opt-Voting-FKS* (*F*) демонстрирует высокий результат по комплексной метрике (гармоническое среднее между точностью и полнотой модели) *F1-Score* (0.967), превосходя базовый *Voting-FKS* (*F*) на 13.3%. Все модели, кроме *Voting-FKS* (*F*), превышают целевой порог 0.9, что подтверждает эффективность оптимизации.

На рисунке 1 представлен график сравнения результатов работы оптимизированного ансамблевого метода *Opt-Voting-KFS* с контрольным методом *Voting-KFS* по метрике *F1-Score*.

Таблица 3 – Сравнительная оценка эффективности оптимизированного ансамблевого метода Opt-Voting-KFS с контрольным методом Voting-KFS

Метод	Accuracy	Recall	F1 Score	Precision	MSE	CV F1 Mean	CV F1 Std
Voting-FKS (F)	0.857	0.857	0.834	0.813	0.285	0.964	0.026
Voting-FKS(S)	0.952	0.952	0.953	0.960	0.047	0.977	0.016
Opt-Voting-FKS (F)	0.967	0.967	0.967	0.973	0.033	0.993	0.014
Opt-Voting-FKS(S)	0.933	0.933	0.932	0.941	0.066	0.982	0.022

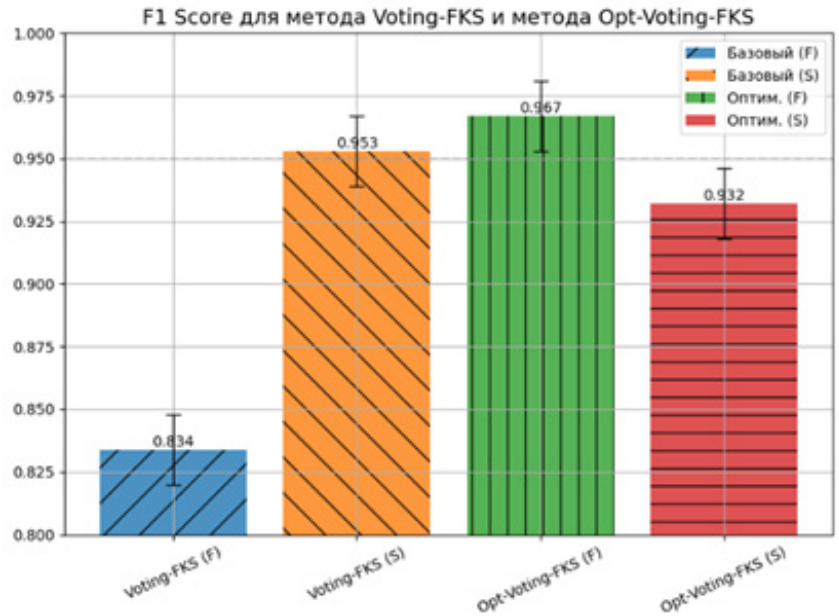


Рисунок 1 – График сравнения результатов работы оптимизированного ансамблевого метода Opt-Voting-KFS с контрольным методом Voting-KFS по метрике F1-Score

Обсуждение. Проведенное исследование реализовало последовательный подход к созданию оптимизированного ансамблевого алгоритма для мультизадачной классификации. На первом этапе из пяти протестированных методов машинного обучения (*Random Forest, Gradient Boosting, SVM с RBF*-ядром, *Decision Tree* и *KNN*) был выбран *Random Forest* как базовый алгоритм, продемонстрировавший наилучший баланс между точностью, устойчивостью к переобучению и способностью работать с многомерными медицинскими данными.

На втором этапе сравнивались три метода ансамблирования: *Bagging, Boosting* и *Voting*.

Метод *Bagging* показал ограниченную эффективность для мультизадачной классификации. Как отмечается в работе [20], повышение эффективности метода *Bagging* возможно за счет использования нейронных сетей в качестве базовых моделей, что позволяет улавливать скрытые паттерны через автоматическое извлечение признаков. Дополнительные методы, такие как случайные подпространства (*random subspaces*) [21] или *adversarial training*, могут усилить разнообразие ансамбля и его устойчивость к шуму. Для задач с высокой мультиколлинеарностью, типичных для медицинских данных, перспективным направлением является комбинирование метода *Bagging* с методами *feature engineering*, включая генерацию полиномиальных признаков или применение методов снижения размерности (*PCA, t-SNE*) [22-24].

Метод *Boosting* продемонстрировал идеальные значения по всем метрикам для обеих целевых переменных, однако такие результаты указывают на переобучение, особенно в условиях ограниченного объема данных, наличия шума и мультиколлинеарности признаков. Переобучение может также возникать из-за чрезмерной адаптации модели к специфике обучающей выборки, что снижает ее способность к обобщению на новых данных. Для минимизации этого риска, как отмечается в работах, критически важно применять методы регуляризации [25], такие как *L1/L2*-нормы, а также кросс-валидацию с агрегированием предсказаний по фолдам (*out-of-fold predictions*). Кроме того, перспективным направлением для улучшения метода *Boosting* может стать использование ранней остановки (*early stopping*) или динамического уменьшения скорости обучения (*learning rate decay*), что позволяет контролировать процесс обучения и избегать избыточной подгонки под шумовые паттерны. Увеличение объема данных, включая синтетические выборки, сгенерированные методами вроде *SMOTE*, также способно повысить устойчивость модели, как подчеркивается в исследованиях [26].

Экспериментальные результаты показали, что метод *Voting* с мягким голосованием обеспечивает наиболее стабильные показатели качества классификации при работе с небольшими и сложно структурированными медицинскими наборами данных. Незначительная разница в производительности между двумя задачами может объясняться сложностью зависимостей в данных: фиброз, как правило, имеет более четкие биомаркеры, тогда как стеатоз часто сопряжен с нелинейными взаимодействиями признаков, которые труднее уловить стандартными алгоритмами. Устойчивость метода *Voting* к переобучению, возможно связана с диверсификацией базовых моделей, что снижает зависимость от шума в данных. Хотя стандартный *Voting* допускает взвешенное голосование, веса обычно задаются вручную. Для максимизации точности (особенно в диагностике стеатоза) можно воспользоваться оптимизацией с помощью градиентного спуска или генетических алгоритмов, как предложено в работе [27]. Интеграция в ансамбль более сложных алгоритмов, новых способов построения ансамблей [28] (*XGBoost)* или глубокие нейронные сети, способна улучшить классификацию за счет учета нелинейных паттернов, что подтверждается исследованиями [29, 30, 31]. Для медицинских приложений, где интерпретируемость модели играет ключевую роль, дополнительным шагом может стать использование методов объяснимого ИИ (*XAI*), например, *SHAP*-анализа, для оценки вклада отдельных признаков и моделей в итоговое предсказание. Метод *Voting* был выбран в качестве основы для мета-модели благодаря его способности эффективно комбинировать предсказания отдельных классификаторов.

Третий этап исследования был посвящен оптимизации выбранного *Voting*-ансамбля. Ключевыми улучшениями стали: динамическая оптимизация весов классификаторов на основе кросс-валидации, разработка адаптивного конвейера предобработки данных с модифицированным *SMOTE*, создание мультизадачной архитектуры с раздельными конвейерами обработки.

Реализация системы двойной валидации подтвердила надежность предложенного подхода. Оптимизированный алгоритм продемонстрировал значительное улучшение метрик качества: *F1-Score* увеличился на 13.3% по сравнению с базовой моделью *Random Forest*, достигнув значения 0.967 для задачи классификации стеатоза. При этом модель показала высокую устойчивость (стандартное отклонение *F1-Score* < 0.02) и отсутствие признаков переобучения.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности предложенного поэтапного подхода к разработке ансамблевых алгоритмов, сочетающего: тщательный отбор базовых моделей, сравнительный анализ методов ансамблирования, целенаправленную оптимизацию выбранной архитектуры.

Особую ценность представляет разработанная мультизадачная архитектура, позволяющая одновременно решать несколько взаимосвязанных медицинских задач классификации с сохранением высокой точности предсказаний.

Выводы. Проведенное исследование позволило разработать и оптимизировать ансамблевый алгоритм для мультизадачной классификации стадий фиброза и стеатоза, основанный на поэтапном отборе и комбинировании методов машинного обучения. Сравнительный анализ пяти базовых алгоритмов выявил *Random Forest* как наиболее эффективный метод для работы с многомерными медицинскими данными, что подтвердилось его устойчивостью к шуму и способностью сохранять высокую точность на несбалансированных выборках.

Среди трех исследованных методов ансамблирования *(Bagging, Boosting* и *Voting*) наилучшие результаты продемонстрировал подход *Voting* с мягким голосованием, который был выбран в качестве основы для мета-модели. Последующая оптимизация данного подхода, включавшая динамическое взвешивание классификаторов, разработку адаптивного конвейера предобработки с модифицированным *SMOTE* и создание мультизадачной архитектуры, позволила достичь значительного улучшения показателей качества.

Ключевым результатом работы стало создание оптимизированного *Voting*-ансамбля, превосходящего по *F1*-мере (0.967) как исходный *Random Forest*, так и другие методы ансамблирования. Особенностью предложенного подхода является реализация механизма динамического взвешивания вклада отдельных моделей на основе кросс-валидации, что принципиально отличает его от классических ансамблей с фиксированными весами.

Практическая значимость исследования заклю-

чается в разработке диагностической системы, способной одновременно анализировать несколько взаимосвязанных патологий с высокой точностью. Для успешного внедрения в клиническую практику рекомендуется: обеспечение интерпретируемости модели с помощью методов *XAI*, оптимизация вычислительной эффективности для работы в реальном времени, валидация на мультицентровых данных.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция методов глубокого обучения для автоматического извлечения признаков, а также учет временных зависимостей и дополнительных клинических показателей для повышения точности прогнозирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пивторак Е.В. Нарушения функции эндотелия у больных неалкогольной жировой болезнью печени // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2022. – № 2 (102). – С. 63.

2. Патлусов Е.П. Клиническая и прогностическая оценка инвазивной и неинвазивных методик диагностики фиброза печени у больных хроническим гепатитом С: дис. канд. мед. наук.: 14.01.09, Инфекционные болезни. – М., 2018.

3. Неалкогольная жировая болезнь печени с позиций современной медицины / И.В. Маев, Д.Н. Андреев, Ю.А. Кучерявый, Д.Т. Дичева, Е.И. Кузнецова. – М.: Прима Принт, 2020. – 68 с.

4. Sweidan, S.A Fibrosis Diagnosis Clinical Decision Support System Using Fuzzy Knowledge / S. Sweidan, E. Shaker, E. Hazem, S. Sahar, A. Farid, K. Kyung-Sup// Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – V. 44. – P. 3781-3800.

5. Saleh, E. Diabetes retinopathy risk estimation using fuzzy rules on electronic health record data. / E. Saleh, A. Valls, A. Moreno, P. Romero // Modeling Decision for Artificial Intelligence MDAI Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – V. 9880. – P. 263-274.

6. Nazari S., Fallah M., Kazemipoor H., Salehipour A. A fuzzy inference- fuzzy analytic hierarchy process-based clinical decision support system for diagnosis of heart diseases // Expert System Application. – 2018. – V. 95 – P. 261-271.

7. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015: 18th international conference. Springer International Publishing, 2015. – P. 234-241

8. Собянин, К.В., Куликова, С.П. (2024). Unet-boosted classifier – мультизадачная архитектура для малых выборок на примере классификации МРТ снимков головного мозга. Информатика и автоматизация, 23(4), 1022-1046.

9. Бондаренко, В.А. Исследование и разработка алгоритмов к формированию эффективного ансамбля сверточных нейронных сетей для классификации изображений / В.А. Бондаренко, Д.И. Попов // Программные системы и вычислительные методы. – 2024. – № 1. – С. 48-67. – DOI 10.7256/2454-0714.2024.1.69919.

10. Сидоренко, Д.А. Методы ансамблирования алгоритмов классификации на базе сбалансированных данных / Д.А. Сидоренко, Ю.В. Богомолов // Заметки по информатике и математике: Сборник научных статей. Том Выпуск 10. – Ярославль: Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 2018. – С. 153-160. – EDN WQXKYK.

11. Татарников, В.В. Алгоритм усреднения центроидов для построения кластерного ансамбля / В.В. Татарников, И.А. Пестунов, В.Б. Бериков // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 712-718. – DOI 10.18287/2412-6179-2017-41-5-712-718.

12. Попова, О.А. Анализ методов векторизации текстовых документов / О.А. Попова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 85. – С. 96-102.

13. Breiman, L. Random Forests // Machine Learning – 2001. – NO 45 – P. 5-32.

14. Дискриминационный анализ. Непараметрическая дискриминация: свойства согласованности Эвелин Фикс и Дж. Л. Ходжес-младший. Международное статистическое обозрение // Revue Internationale de Statistique. 1989. Том. 57, № 3. – С. 238-247.

15. Jerome H. Friedman Greedy function approximation: A gradient boosting machine. //Ann. Statist. – 2001 – V.29(5) – P. 1189-1232.

16. Quinlan, J.R. Induction of decision trees // Mach Learn. – 1986. – NO 1. – P. 81-106.

17. Breiman, L. Bagging predictors // Mach Learn. – 1996. – NO 24. – P. 123-140.

18. Schapire, R.E. A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting //Journal of Computer and System Sciences. – 1997. – NO 55(1). – P. 119-139.

19. Galton, F. Vox Populi. Nature. – 1907. – NO 75. – P. 450-451.

20. Yang, Shuang & Browne, Antony. Neural network ensembles: Combining multiple models for enhanced performance using a multistage approach // Expert Systems. – 2004. – NO. 21. – P. 279-288.

21. Tin Kam Ho. Random subspace method for constructing decision forests// IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – V. 20. – NO. 8. – 1998. – P. 832-844.

22. Hegde, Chinmay and Wakin, Michael and Baraniuk, Richard. Random Projections for Manifold Learning// Advances in Neural Information Processing Systems. – 2007. – V. 20.

23. Горбачев, С.В. Исследование ансамблевых методов бэггинга и бустинга / С.В. Горбачев, В.И. Сырямкин // Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции: сборник материалов IV Международного форума, Томск, 15-16 декабря 2021 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2022. – С. 23-24.

24. David H. Wolpert, Stacked generalization. Neural Networks.V. 5. – Is. 2. – 1992. – P. 241-259.

25. Friedman, J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. Annals of Statistics. – 2001. – V. 29(5). – P. 1189-1232.

26. Feurer, M., Hutter, F. Hyperparameter Optimization. In: Hutter, F., Kotthoff, L., Vanschoren, J. (eds) Automated Machine Learning. The Springer Series on Challenges in Machine Learning. Springer, Cham. – 2019.

27. Загинайло, М.В. Генетический алгоритм как эффективный инструмент эволюционных алгоритмов / М.В. Загинайло, В.А. Фатхи // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 22. – С. 513-518.

28. Rich Caruana, Alexandru Niculescu-Mizil, Geoff Crew, and Alex Ksikes. Ensemble selection from libraries of models. In Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning (ICML '04). Association for Computing Machinery. – 2004. – New York, NY, USA, NO.18.

29. James Bergstra and Yoshua Bengio. Random search for hyper-parameter optimization. J. Mach. Learn. Res. 13. – 2012. – P. 281-305.

30. Grigoreva, A.A. Ensemble methods for solving problems of medical diagnosis / A.A. Grigoreva, A.I. Trufanov, S.V. Grigorev // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics. – 2023. – Vol. 1, No. 1. – P. 28-31.

31. Галимова, М.В. Анализ эффективности ансамблевых методов для повышения точности бинарных классификаторов на основе показателя ROC-кривой / М.В. Галимова // Наукосфера. – 2024. – № 7-1. – С. 13-17.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.9:681.3
EDN: QDSKTL

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ С ПОВЫШЕННОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬЮ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 4985-4344
ORCID: 0009-0006-0801-429X

ПЕТУШКОВ Григорий Валерьевич, проректор
МИРЭА – Российский технологический университет
(119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: petushkov@mirea.ru)

SPIN: 2869-5663
AuthorID: 17622
ORCID: 0000-0002-1216-3339

СИГОВ Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН, президент
МИРЭА – Российский технологический университет
(119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78, e-mail: sigov@mirea.ru)

Аннотация. Рассматриваются вычислительные системы кластерного типа с модульной избыточностью, когда задачи отказавших узлов автоматически перераспределяются на остальные работоспособные узлы. В реальных условиях эксплуатации вычислительного кластера рядовому собственнику или пользователю хорошо известные методы аппаратного резервирования кластера недоступны. Существуют и используются программные способы повышения отказоустойчивости кластера, которые могут быть ориентированы на различные операционные системы, на виртуализацию машин и баз данных. В числе этих способов – полнофункциональные отказоустойчивые методы, специфичные для приложений, основанных на задачах. Одни приложения допускают повторное выполнение нескольких реплик, а другие могут быть очень требовательными к времени решения задачи. Целью работы является выбор и дальнейшая реализация подхода к формирования работоспособной (рабочей) структуры вычислительного кластера в условиях его частичной деградации, вызванной не только отказами программного обеспечения и оборудования, но и перегрузкой компьютеров. Отличительной особенностью выбранного для реализации подхода является то, что для упрощения программирования, доступного для прикладного или системного программиста, предложена масштабируемая логико-алгебраическая исполнимая модель процесса восстановления работоспособности вычислительного кластера. Показано, что в основу создания отказоустойчивых и работоспособных функциональных архитектур кластерных и грид вычислительных систем целесообразно положить методику, основанную на формализованных логико-алгебраических спецификациях, что в целом соответствует современным концепциям разработок, управляемых моделями (*MDD – Model-Driven Development*) и разработок приложений на основе правил предметной области (*DDD – Domain-Driven Design*). Предложенные модели возможно модифицировать для создания на их основе как отказоустойчивых вычислительных кластеров, так и распределенных грид-систем и волонтерских метакомпьютеров с повышенной отказоустойчивостью.

Ключевые слова: вычислительные кластеры, отказоустойчивость, работоспособность, исполнимые модели, грид-системы, волонтерские вычисления, метакомпьютеры.

FUNCTIONAL ORGANIZATION OF COMPUTING CLUSTERS WITH INCREASED FAULT TOLERANCE

© Author(s) 2025

PETUSHKOV Grigory Valerievich, vice-rector
MIREA – Russian Technological University
(119454, Russia, Moscow, Vernadsky Ave., 78, e-mail: petushkov@mirea.ru)

SIGOV Alexander Sergeevich, doctor of physical and mathematical sciences,
professor, academician of the Russian Academy of Sciences, President
MIREA – Russian Technological University
(119454, Russia, Moscow, Vernadsky Ave., 78, e-mail: sigov@mirea.ru)

Abstract. This paper considers cluster-type computing systems with modular redundancy, where the tasks of failed nodes are automatically redistributed to other operational nodes. In real-world operation of computing clusters, conventional hardware redundancy methods are often unavailable to ordinary owners or users. Instead, software-based ap-proaches to improving cluster fault tolerance are employed, which may target various operating systems, virtualiza-tion of machines, and databases. Among these are fully functional fault-tolerant methods specific to task-based applications. Some applications allow repeated execution of several replicas, while others are highly demanding in terms of task execution time. The purpose of this work is to select and further implement an approach to forming a functional (operational) structure of a computing cluster under conditions of partial degradation, caused not only by software and

hardware failures but also by computer overload. A distinctive feature of the proposed approach is the introduction of a scalable logic-algebraic executable model of the cluster recovery process, designed to simplify programming for both application and system developers. It is demonstrated that the creation of fault-tolerant and functional architectures of cluster and grid computing systems can be effectively based on formalized logic-algebraic specifications. This approach is generally consistent with modern concepts of *Model-Driven Development* (*MDD*) and *Domain-Driven Design* (*DDD*). The proposed models can be adapted to design not only fault-tolerant computing clusters but also distributed grid systems and volunteer metacomputers with enhanced fault tolerance.

Keywords: computing clusters, fault tolerance, performance, executable models, grid systems, volunteer computing, metacomputers.

Для цитирования: *Петушков Г.В. Функциональная организация вычислительных кластеров с повышенной отказоустойчивостью / Г.В. Петушков, А.С. Сигов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 55-64. – EDN: QDSKTL.*

Введение. Современные параллельные системы являются, по существу, гибридными и включают в свой состав параллельные компьютеры с многоядерными процессорами, общей памятью и сети с распределённой памятью для решения крупномасштабных задач [1]. Наборы инструментальных средств для параллельных вычислений позволяет программистам максимально эффективно использовать многоядерные процессоры, графические процессоры и вычислительные кластеры [2].

Известны успешные реализации проектов вычислительных систем кластерного типа, основанные на параллельных вычислениях. Например, недавно достигнутая производительность волонтерский сети *Folding@Home* стала выше, чем у всех суперкомпьютеров, достигнув производительности уровня в 2,4 эксафлопса [3] (1 эксафлопс означает 10^{18} операций с плавающей запятой в секунду). Более миллиона волонтеров-добровольцев, среди которых – российские участники, предоставили свободное время своих компьютеров для проведения удаленных расчетов, связанных с моделированием пространственной структуры *S*-белка коронавируса *SARS-CoV-2* [4]. Проекты организации распределенных вычислений и обработки данных подобного уровня реализуются на основе технологий метакомпьютинга и грид-систем [5-7].

Вычислительные кластеры (*High performance computing clusters, HPC*) могут содержать до тысячи и более многоядерных процессоров. Многие кластеры занимают высокие места в международном рейтинге TOP500. Программное обеспечение для объединения компьютеров в виртуальный суперкомпьютер открыло возможность быстрого создания кластеров.

Целью работы является выбор и дальнейшая реализация подхода к формирования работоспособной (рабочей) структуры вычислительного кластера в условиях его частичной деградации, вызванной не только отказами программного обеспечения и оборудования, но и перегрузкой компьютеров.

Методология. Предлагаемая методология основана на поэтапной реализации новых исполнимых логико-алгебраических и логико-вероятностных моделей отказоустойчивых вычислительных кластеров. Модели относятся к классу исполнимых, так как они указывают на порядок действий (сценарий) моделируемой системы и могут быть использованы в качестве формализованных спецификаций при реализации управляющих программ.

Вычислительные кластеры: особенности функционирования и отказоустойчивость. Вычислительный кластер – это разновидность параллельной или распределённой системы, состоящей из группы связанных между собой компьютеров, которые используются как единый, унифицированный компьютерный ресурс [8]. В общем случае задача повышения отказоустойчивости является сложной и решается за счет введения избыточности – при возможности резервируются компьютеры, коммутаторы, линии связи, электропитание и др.

Отказоустойчивыми кластерами (*Fault Tolerant Cluster, FTC*) называются кластеры, отказ какого-либо узла в которых не приводит к полной неработоспособности всего кластера. В кластерах с холодным резервом, или «активный-пассивный», активный узел выполняет запросы, а пассивный ждет его отказа и включается в работу, когда отказ произойдет. Кластеры с горячим резервом, или «активный-активный», отличаются тем, что все узлы выполняют запросы, а в случае отказа одного нагрузка перераспределяется между оставшимися. Выделяются также кластеры с модульной избыточностью. Задачи отказавших узлов автоматически перераспределяются на остальные работоспособные узлы [9, 10].

Из состава отказоустойчивых кластеров выделяются кластеры непрерывной доступности (*Continuous Availability, CA*) [11], которыми пользователь может воспользоваться в произвольный момент времени и кластеры высокой доступности (*High Availability, HA*) [12] в течение отказа которого обслуживание пользователя будет прервано на время восстановления работоспособной конфигурации.

Существует большое число методов обеспечения отказоустойчивости вычислительных кластеров, различающихся предъявляемыми к ним требованиями. Источниками отказов могут быть оборудование, программное обеспечение, сетевые коммуникации, человеческие ошибки и окружающая среда.

Этапы реакции системы мониторинга кластера

на отказы [13, 14]:

1. Ограничение сбоев в одной области системы для предотвращения распространения последствий на всю систему.

2. Обнаружение отказов. На этом этапе происходит распознавание неординарных событий в системе.

3. Диагностика. Производится при отсутствии полезного результата от реализации предыдущего этапа, то есть если не получена информация о местоположении и свойствах неисправности.

4. Реконфигурация. Действия этого этапа выполняются, когда обнаружены неисправность и постоянный отказ; в этом случае система может переконфигурировать свои компоненты либо для замены неисправного компонента, либо для его изоляции от остальной системы.

5. Восстановление. При восстановлении используются методы устранения последствий неисправностей. Основные подходы к восстановлению основаны на маскировке неисправностей, повторной попытке и откате.

6. Перезапуск. После восстановления неповрежденной информации реализуется какой-либо метод перезапуска приложения: возобновление всех операций с точки обнаружения сбоя; перезапуск только некоторых процессов; полная перезагрузка системы.

7. Ремонт неисправного компонента или переключение на резерв; при этом работа системы может быть прервана.

8. Реинтеграция восстановленного компонента в систему.

Содержательное описание метода повышения отказоустойчивости кластера. В реальных условиях эксплуатации вычислительного кластера рядовому собственнику или пользователю хорошо известные методы аппаратного резервирования кластера недоступны. В то же время существуют и используются программные способы повышения отказоустойчивости кластера, тем более что функциональность большинства вычислительных кластеров обеспечивается на уровнях прикладного (решение задачи) и промежуточного (реализация интерфейса с пользователем) программного обеспечения. Известны программные средства обеспечения отказоустойчивости кластера, которые могут быть ориентированы на различные операционные системы, на виртуализацию машин и баз данных [15].

Особый интерес представляют методы обеспечения отказоустойчивости вычислительных кластеров, основанные на реализации алгоритмов: так называемые *ABFT*-методы (*Algorithm Based Fault Tolerant techniques*) [15]. В числе этих отказоустойчивых методов – полнофункциональные отказоустойчивые методы, специфичные для приложений, основанных на задачах. Одни приложения допускают повторное выполнение нескольких реплик, а другие могут быть очень требовательными к времени решения задачи. Существуют приложения, реализующие различные алгоритмы восстановления потерянных данных, а также приложения, запускаемые повторно при меньшем числе процессоров [16].

Подход, используемый в настоящей работе для организации программного метода повышения отказоустойчивости кластера, соответствует работам [14-16]. Отличительной особенностью его реализации является то, что для упрощения программирования, доступного для прикладного или системного программиста, предложена масштабируемая логико-алгебраическая исполнимая модель процесса формирования работоспособной (рабочей) структуры вычислительного кластера в условиях его частичной деградации, вызванной не только отказами программного обеспечения и оборудования, но и перегрузкой компьютеров.

Некоторые общие известные вопросы анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем, рассматриваемых как сложные системы, описаны в работе [17]. Однако следует отметить трудоемкость нахождения временных параметров, характеризующих работу кластера при отказах разного рода. Часть событий относится к числу очень редких, происходящих в течение часов, дней, месяцев, делающих сбор статистических данных очень трудоемким и требующим больших затрат времени. Другие события являются следствием неправильной эксплуатацией, неожиданным отключением электропитания, вредным влиянием окружающей среды.

Типовая архитектура вычислительного кластера представлена на рисунке 1. Кластер построен на основе быстродействующего коммутатора частной локальной сети, работающего на канальном уровне *L2* [18]. На этом уровне могут использоваться быстродействующие коммутаторы *InfiniBand* [19], *Myrinet* [20], Ангара [21]. Узлы кластера также подключены к общедоступной локальной сети через коммутатор *Gigabit Ethernet* уровня *L3*. Третий коммутатор уровня *L2*+ связывает пользователей с серверами общедоступной сети. Управляющий узел кластера Y_0 и его дубликат R_0 подключены к двум коммутаторам.

Содержательная постановка задачи заключается в следующем. Пусть, например, время выполнения задачи условно равно единице. В процессе подготовки решения задачи на кластере, включающем, например, 16 узлов, задача разбивается на одинаковые части, тогда время выполнения каждой части равно 1/16.

В случае полностью надежного кластера общее время выполнения задачи без учета времени на сбор результатов выполнения всех подзадач будет равно 1/16. В случае отказа какого-либо одного узла в процессе выполнения своей подзадачи осуществляется ее перезапуск на резервном узле или на любом из узлов, только что выполнившим свою часть задания.

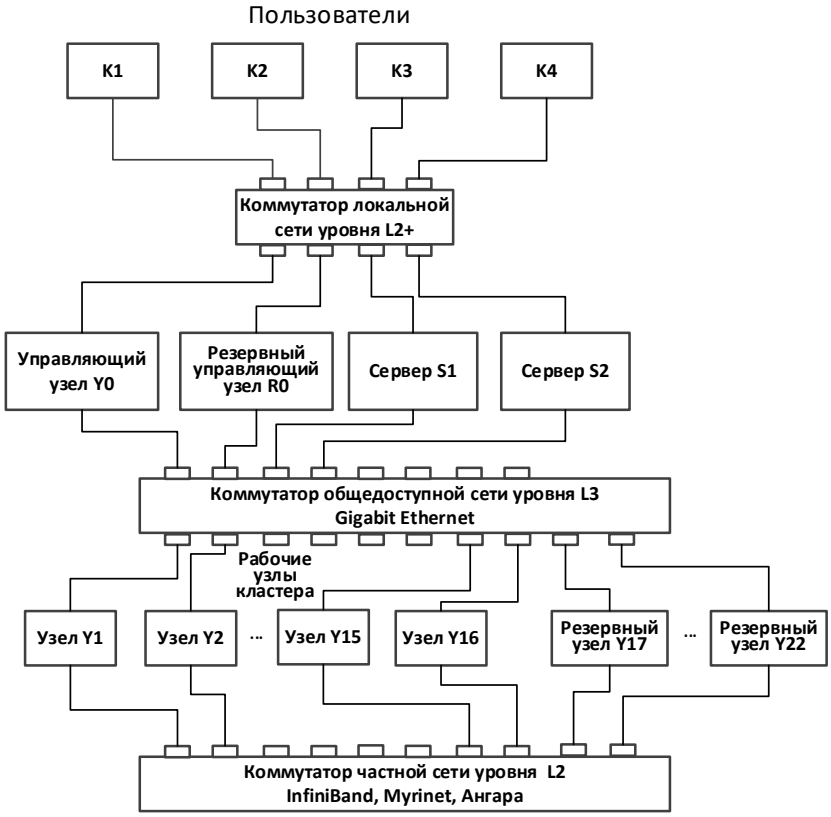


Рисунок 1 – Архитектура вычислительного кластера, встроенного в инфраструктуру локальной вычислительной сети

Тогда для получения окончательного результата потребуется 1/16 + 1/16 = 2/16. Такое время сохраняется и при первоначальных (если все отказы происходят за время выполнения основной части заданий) отказах 2, 3, ..., 8 узлов, если пренебречь временем загрузки тех частей заданий от общего задания, которые не были выполнены из-за отказов узлов.

Для работы кластера в режиме *SPMD* (*Single Program – Multiple Data*) обычно на каждый узел кластера параллельно в широковещательном режиме работы коммутатора загружаются копии одной и той же программы с настроечными параметрами и с копиями данных, сгруппированных в одном файле. В подобном несколько идеализированном случае время выполнения задания будет определяться так, как это показано в таблице 1 и таблице 2 при исходных $N = 32$ узлах и $N = 16$ в вычислительном кластере. Результаты легко распространяются на другое исходное число узлов.

Таблица 1 – Время выполнения задания при числе узлов N=32

Число оставшихся узлов кластера	Время полного выполнения задания
M = N =32	1/32
16 ≤ M ≤32	2/32
8 ≤ M <16	4/32
4 ≤ M <8	8/32
2 ≤ M <4	16/32
M = 1	32/32

Таблица 2 – Время выполнения задания при числе узлов N=16

Число оставшихся узлов кластера	Время полного выполнения задания
M = N = 16	1/16
8 ≤ M <16	2/16
4 ≤ M <8	4/16
2 ≤ M <4	8/16
M = 1	16/16

Формализованная модель вычислительного кластера с повышенной отказоустойчивостью. В процессе формализации модели вводится в рассмотрение множество $Y = \{y_1, y_2, \ldots, y_K\}$ для обозначения множества узлов вычислительного кластера, и отдельно определено одноэлементное множество $\{y_0\}$, где y_0 обозначает выделенный управляющий узел кластера, соответствует адресу одного из узлов кластера и определяется сервером пользователя. В логико-алгебраической модели обозначения y_0, y_1, y_2, …, y_K представляют собой предметные константы в исчислении предикатов первого порядка. Здесь $K \geq N$, а разность $C = K - N$ равна числу резервных узлов. Вводится характеристическая функция (унарный предикат) $S_0(y)$ множества Y. В дальнейшем определении модели вводятся также вспомогательные характеристические функции $S(y)$, $S_1(y)$ и $S_2(y)$ для множеств Y, Y_1 и Y_2 соответственно, используемые при переборе узлов или изменении состава узлов в кластере.

В реальном приложении в качестве констант

y_0, y_1, y_2, …, y_K могут рассматриваться *MAC*-адреса (*Medium Access Control addresses* – адреса управления доступом к среде передачи данных), или аппаратные адреса *Ethernet*, – физические адреса узлов вычислительного кластера, являющихся единицами сетевого оборудования в стандарте компьютерных сетей *Ethernet* [18]. В качестве адресов при передаче данных внутри подсетей для идентификации узлов кластера как компонентов сети *InfiniBand* используются *LID* (*Local ID*, локальные идентификаторы) [19], которые также можно использовать в качестве предметных констант, то есть значений предметной переменной *y*.

Имена подзадач, решаемых узлами кластера, задаются в модели множеством $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_N\}$. Для множества X введена характеристическая функция $Q(x)$ и вспомогательная характеристическая функция $Q_1(x)$.

В логико-алгебраических выражениях исполнимой модели круглые, квадратные и фигурные скобки являются элементами синтаксиса. Выражение $[A]\{B\}$ соответствует репликации группы операций B, причем число повторений составного выражения B задается выражением A. Выражением $[\alpha](\{B_1\} \vee \{B_2\})$ задается выбор одной из альтернатив $\{B_1\}$ или $\{B_2\}$ в зависимости от истинности или ложности логического условия α. Нотация последнего выражения выбрано из работ [22, 23], в которых использованы системы алгоритмических алгебр. Логика выполнения ЛАОВ определяется не только условиями, заключенными в квадратные скобки. Основной операцией является операция «←» модификации предиката, результатом выполнения которой является событие, заключающееся во включении какой-либо предметной константы или кортежа, содержащего константы, в область истинности какого-либо предиката, либо в исключении из нее.

Операции модификации предикатов и функций были активно использованы в работе [24]. Первоначальный состав операций ЛАОВ был предложен в работах [25, 26] и модифицирован в работе [27].

В дальнейшем там, где это не будет противоречить семантике модели, будут отождествляться объекты в формальной модели с объектами предметной области – вычислительного кластера. Например, при выполнении операции модификации предиката *Send**(y_0, y) ← ***true*** в узле y_0 в его область истинности включается кортеж $< y_0, y >$, что интерпретируется как отправка сообщения от управляющего узла кластера y_0 рабочему узлу кластера, номер, или адрес, которого определяется как значение предметной переменной *y*. Звездочка при имени предиката означает, что в операции передачи и приема сообщения участвуют два узла – передающий y_0 и принимающий *y*. После получения подтверждения узлом y_0 об успешном приеме сообщения узлом y по умолчанию выполняется операция *Send**(y_0, y) ← ***false***. Подобная интерпретация логико-алгебраических выражений ЛАОВ практически не затрудняет составление сетевых приложений. От программиста требуется только знание основ сетевого программирования.

Другое выражение для операции модификации предиката в формальной модели *Ready***(y, y_0) ← ***true*** соответствует событию передачи ответного сообщения от рабочего узла у управляющему узлу y_0 кластера; по завершении приема сообщения в узле y_0 по умолчанию выполняется операция

*Ready***(y, y_0) ← ***false***, соответствующая успешной передаче сообщения от узла y узлу y_0. Двойная звездочка означает, что инициатором передачи сообщения является узел y, а узел y_0 ожидает сообщение.

Логико-алгебраическая исполнимая модель приложения, предназначенного для повышения отказоустойчивости вычислительного кластера. Формализованная исполнимая модель предназначена для последующего использования в качестве формализованных спецификаций для программы, реализующей подход к повышению отказоустойчивости вычислительного кластера. Модель описана четырьмя логико-алгебраическими выражениями и носит декларативно-поведенческий характер. Все выражения ЛАОВ реализуются управляющей программой, размещенной на управляющем узле y_0 кластера, выдающего команды рабочим узлам кластера через коммутатор частной сети.

1. Управляющий узел вычислительного кластера определяет готовые к использованию узлы, которые имеются в наличии, путем опроса каждого узла; от каждого узла ожидается ответ о готовности до истечения тайм-аута t_1:

$$
\begin{aligned}
&L_1 = [\forall_{Do}(y \in Y)]\{S(y) \leftarrow S_0(y)\};\\
&Ready^{**}(y, y_0) \leftarrow \textbf{\textit{false}};\\
&[\exists_{Any}(y \in Y)\ S(y)](\{Send^{*}(y_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\\
&\{TimeOut^{*}(t_1) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\\
&Ready^{**}(y, y_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\},\\
&[Ready^{**}(y, y_0)]\ (\{S(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}},\\
&S_1(y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee S(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}) \vee \mathrm{E}).
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Комментарии. $[\forall_{Do}(y \in Y)]\{S(y) \leftarrow S_0(y)\}$ – для каждого узла y из множества узлов Y выполняется присваивание (модификация предиката) $S(y) \leftarrow S_0(y)$, где $S_0(y)$ и $S(y)$ – две одинаковые характеристические функции множества Y (из них $S(y)$ – вспомогательная), $\forall_{Do}$ – квантифицированный оператор, указывающий на то, чтобы все действия в фигурных скобках были выполнены. При помощи оператора $\exists_{Any}(y \in Y)\ S(y)$ последовательно из области истинности унарного предиката $S(y)$ последовательно перебираются константы y_1, y_2, …, y_K, обозначающие в реальной системе рабочие узлы кластера. При каждом успешном выборе последовательно выполняются действия, заключенные в фигурные скобки. Операция *Send**(y_0, y) ← ***true*** имитирует

отправку в рабочий узел кластера опрашивающего сообщения о его готовности к работе. Затем в узле y_0 выдерживается тайм-аут t_1, инициируемый выполнением операции $TimeOut^*(t_1) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$. В течение тайм-аута ожидается получение ответа от опрашиваемого рабочего узла кластера $Ready^{**}(y, y_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$ о его готовности к работе. Его готовность отмечается путем формирования области истинности предиката: $S_1(y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$. Так последовательно осуществляется выбор из множества Y доступных для опроса узлов кластера. Если за время тайм-аута t_1 рабочий узел не отвечает, то высказывание $Ready^{**}(y, y_0)$ остается ложным, и данный узел в область истинности итогового предиката $S_1(y)$ не включается, что следует из выражения:

$[Ready^{**}(y, y_0)]$ ($\{S(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}$,
$S_1(y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee \{S(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\}$).

По завершении первого этапа модели должно быть сформировано множество Y_1 с характеристической функцией $S_1(y)$, содержащее все работоспособные узлы, способные работать в кластере. Далее рассматриваются следующие ситуации: если узлов достаточно для образования кластера, то следом выполнятся загрузка узлов программами и данными; если годных узлов оказалось больше, чем было необходимо для решения задачи, то они включаются в резерв, и, наконец, если узлов меньше, минимально необходимого числа для решения задачи, то управляющий узел, а через него и пользователь, оповещаются от этом.

2. Формирование состава рабочих узлов кластера, именование или нумерация этих узлов для использования имен или номеров в программах; происходит аварийный выход $Exit_1(R_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$, если не хватает узлов для формирования кластера для заранее определенного числа подзадач X; отношение R_0, связывающее подзадачи из множества X с узлами кластера из множества Y_1 передается всем узлам кластера:

$$L_2 = [\exists_{Any}(x \in X)\, Q(x)][\exists_{Any}(y \in Y_1)\, S_1(y)](\{R_0(x, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},$$
$$Q(x) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, S_1(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, S_2(y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},$$
$$Q_1(x) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Exit_1(R_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}) \vee E);$$
$$[\forall_{Do}(y \in Y_2)]\{SendD^*(y_0, R_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\}. \qquad (2)$$

Комментарии. В квадратные скобки выражения (2) заключены операторы, с которыми связаны по умолчанию логические условия, принимающие истинные значения, если выполнение операторов успешно завершено и ложные в противном случае. При помощи двух последовательно применяемых операторов выбора $[\exists_{Any}(x \in X)\, Q(x)][\exists_{Any}(y \in Y_1)\, S_1(y)]$ отмечается именованная часть задачи, как значение предметной переменной x в области истинности унарного предиката $Q(x)$ и именованный узел кластера, как значение предметной переменной y в области истинности унарного предиката $S_1(y)$. Если выбор произведен успешно, то кортеж $<x, y>$ с фиксированными значениями его компонент включается в область истинности бинарного предиката $R_0(x, y)$. Затем значения переменных x и y исключаются из областей истинности унарных предикатов $Q(x)$ и $S_1(y)$ соответственно. Таким образом части общей задачи в модели «распределяются» по узлам вычислительного кластера. При выполнении выражения (2) может случиться ситуация, когда значений переменной y будет недостаточно для заданного заранее числа значений переменной x. Для реального кластера это означает, что имеющегося числа рабочих узлов будет недостаточно для размещения частей исходного задания. В этом случае выдается сообщение пользователю; в модели этой выдаче соответствует операция $Exit_1(R_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$. Если же рабочих узлов кластера достаточно для решения поставленной задачи, то результат, то есть таблица, соответствующая области истинности бинарного предиката R_0, передается в широковещательном режиме, то есть параллельно, всем рабочим узлам кластера. Этому действию в модели соответствует завершающая часть выражения (2):

$$[\forall_{Do}(y \in Y_2)]\{SendD^*(y_0, R_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\},$$

где $SendD^*$ – тернарный (трехместный) предикат, моделирующий параллельную передачу данных R_0 от управляющего узла y_0 ко всем остальным рабочим узлам кластера. Широковещательная передача в модели задается оператором $\forall_{Do}(y \in Y_2)$ и реализуется оператором модификации предиката $SendD^*(y_0, R_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}$.

3. Загрузка программ и данных в узлы кластера в режиме широковещания; последующая обработка данных D в каждом узле кластера; передача результатов D_1 в управляющий узел y_0; формирование и передача в узел y_0 значений предиката $R_2(x, y)$, связывающего результаты выполнения подзадач с работоспособными узлами:

$$L_3 = [\forall_{Do}(x, y) \in R_0]\{R_1(x, y) \leftarrow R_0(x, y), R_3(x, y) \leftarrow R_0(x, y)\};$$
$$[\forall_{Do}(x, y) \in R_0]\{SendD^*(y_0, D, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},$$
$$TimeOut^*(t_2) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\};$$
$$[\exists_{Any}(x, y) \in R_1](\{Ready_1D^{**}(y, D_1, y_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}},$$
$$Ready_2D^{**}(y, R_2(x, y), y_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}},$$
$$R_1(x, y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\} \vee E). \qquad (3)$$

Комментарии. В первой строке выражения (3) формируются вспомогательные бинарные предикаты и одноименные им отношения $R_1(x, y)$ и $R_3(x, y)$ – копии предиката и одноименного отношения $R_0(x, y)$, сформированного в результате выполнения выражения (2), которое связывает части задания и рабочими узлами. Во второй строке описана загрузка программ и данных в узлы кластера в режиме широковещания. В третьей и четвертой строках в управляющем узле кластера происходит перебор пар кортежей $<x, y>$, составляющих область истинности бинарного предиката $R_1(x, y)$; каждый рабочий узел осуществляет передачу результирующих данных

в управляющий узел; эти действия задаются операциями с тернарным предикатом $Ready_1D^{**}(y, D_1, y_0) \leftarrow$ ***true*** для каждого y. Аналогично происходит передача в узел y_0 значений предиката $R_2(x, y)$, указывающего на связь результатов выполнения подзадач с работоспособными узлами $Ready_2D^{**}(y, R_2(x, y), y_0) \leftarrow$ ***true***. Напомним, что двойные звездочки соответствуют одноименной передаче сообщений из узла y в узел y_0 и приему этих сообщений управляющим узлом y_0.

4. Проверка результатов на наличие узлов, не выполнивших свои подзадачи:

$$L_4 = [\forall(x, y)\, R_2(x, y)](Exit_2(D_1) \leftarrow \textbf{\textit{true}} \vee$$
$$\vee\ \{[\forall_{Do}(x, y) \in R_3]\{R_3(x, y) \leftarrow \neg R_2(x, y)\},$$
$$[\forall_{Do}(x, y) \in R_3]\{S_0(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\},$$
$$[\forall_{Do}(x, y) \in R_3]\{Q_1(x) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\}\}). \quad (4)$$

Комментарии. Если все подзадачи выполнены, что соответствует в модели истинности всех значений предиката $R_2(x, y)$, то работа кластера признается успешной с выдачей результата $Exit_2(D_1) \leftarrow$ ***true*** пользователю через интерфейс *middleware*. В противном случае производится исключение отказавших узлов из множества Y_0, определение неисполненных подзадач, исключение уже исполненных запросов из множества X и повторное выполнение для неисполненных запросов действий, предписанных логико-алгебраическими выражениями L_1, L_2, L_3.

Пример работы вычислительного кластера с повышенной отказоустойчивостью. Для проверки модели рассматривается работа вычислительного кластера при $N = 16$, то есть в случае, когда для успешного выполнения задания, состоящего из 16 частей требуется нормальная работа 16 узлов кластера. В условном примере принято, что в процессе работы некоторые рабочие узлы могут выходить из строя и становиться недоступными. Считается, что причиной недоступности могут быть не только отказы оборудования и программного обеспечения, но и случаи перегрузки узлов при разрешенном доступе к ним со стороны пользователей общедоступной сети.

Перед началом работы кластера известно, что его оборудование включает 22 узла, из которых 16 рабочих и 6 резервных:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22

В процессе последовательного опроса всех узлов выясняется, что узлы 5, 8, 14 недоступны:

1, 2, 3, 4, ~~5~~, 6, 7, ~~8~~, 9, 10, 11, 12, 13, ~~14~~, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22

К рабочим узлам кластера подсоединяются резервные узлы 17, 18, 19, и образуется полный состав кластера для выполнения заранее подготовленных16 частей задания:

1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19

В процессе выполнения частей задания рабочие узлы 6, 10, 12, 17 не выдали ответ, а остальные узлы успешно справились с выполнением своих частей задания:

1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, ~~10~~, 11, ~~12~~, 13, 15, 16, ~~17~~, 18, 19

Для выполнения оставшихся частей задания выбраны узлы 1, 2, 3, 4:

1, 2, 3, 4

Теперь узлы 2 и 3 не справились с выполнением своих частей задания:

1, ~~2~~, ~~3~~, 4

Для выполнения оставшихся частей задания выбраны узлы 1 и 4, которые успешно завершили выполнение задания:

1, 4

Время выполнения задания без распараллеливания принято за единицу. Тогда полное время выполнения задания складывается из трех интервалов: 1/16+1/16+1/16=3/16. Таким образом, коэффициент ускорения равен 1/(3/16).

Об отказоустойчивости систем распределенных грид-вычислений, волонтерских кластеров и кластеров с высокой производительностью. Принципы реализации грид-систем имеют много общего с кластерной технологией [6-9]. Узлы грид-систем, будучи географически распределенными, могут подключаться и отключаться в процессе работы, поэтому их конфигурация, в отличие от конфигурации вычислительного кластера, как правило, нестабильна. Задачи, решаемые в грид-системах, должны быть разбиты на независимые подзадачи, в чем заключается их сходство с кластерными вычислительными системами. Однако ввиду нестабильности конфигурации при решении одной и той же задачи, как правило, требуется большее число резервных узлов. Нестабильность конфигурации характерно также для кластерных вычислительных систем при наличии независимого доступа к компьютерам со стороны пользователей, компьютеры которых в инфраструктуре кластера подключены к локальной сети общего назначение,

например, через коммутатор *Ethernet*, как показано на рисунке 1.

Наконец, на базе кластеров и грид-подобных вычислительных систем возможна организация так называемых добровольных, или волонтерских, вычислений на основе использования добровольно предоставляемого свободного ресурса персональных компьютеров, в результате чего конфигурация вычислительной системы становится заведомо нестабильной [3, 4, 7].

Логико-алгебраическая исполнимая модель формирования на основе выражений ЛАОВ (1), (2), (3) и (4) конфигурации отказоустойчивого вычислительного кластера соответствует не только случаям сильной его деградации в процессе применений, но и случаям, когда ресурсы рабочих узлов отвлекаются по различным причинам на работу с другими приложениями. Это может приводить к ограничению доступа к узлам кластера. Поэтому программное обеспечение, построенное на основании выражений (1), (2), (3) и (4), позволяет обеспечить повышенную работоспособность кластера и при реализации на нем эпизодических (ограниченных) посторонних, «не кластерных», приложений. Однако при ограничении на возможность использования широковещательной передачи данных, что характерно для глобальных сетей, завершающее выражение в формуле (2):

$[\forall_{Do}(y \in Y_2)\, S_2(y)]\{SendD^*(y_0, R_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\}$

необходимо заменить при программной реализации следующим выражением (5), моделирующим последовательную передачу данных удаленным узлам кластера:

$$[\exists_{Any}(y \in Y_2)\, S_2(y)](\{SendD^*(y_0, R_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ S_2(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\} \vee E). \quad (5)$$

Аналогично, с такой же целью, в выражении (3) часть выражения:

$[\forall_{Do}(x, y) \in R_0]\{SendD^*(y_0, D, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ TimeOut^*(t_2) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\}$

необходимо заменить на выражение (6):

$$[\exists_{Any}(x, y) \in R_0]\{SendD^*(y_0, D, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ TimeOut^*(t_2) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ R_0(x, y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\} \vee E)\}. \quad (6)$$

Таким образом, новые выражения (7) и (8) для модификаций частей модели L'_2 и L'_3, моделирующих работу отказоустойчивой вычислительной системы в глобальной сети без широковещания будут иметь следующий вид:

$$L'_2 = [\exists_{Any}(x \in X)\, Q(x)][\exists_{Any}(y \in Y_1)\, S_1(y)](\{R_0(x, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ Q(x) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, S_1(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}, S_2(y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ Q_1(x) \leftarrow \textbf{\textit{true}}\} \vee Exit(R_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}}) \vee E);$$
$$[\exists_{Any}(y \in Y_2)\, S_2(y)](\{SendD^*(y_0, R_0, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ S_2(y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\} \vee E), \quad (7)$$

$$L'_3 = [\forall_{Do}(x, y) \in R_0]\{R_1(x, y) \leftarrow R_0(x, y),\ R_3(x, y) \leftarrow R_0(x, y)\};$$
$$[\exists_{Any}(x, y) \in R_0]\{SendD^*(y_0, D, y) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ TimeOut^*(t_2) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ R_0(x, y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\} \vee E)\};$$
$$[\exists_{Any}(x, y) \in R_1](\{ReadyD^{**}(y, D_1, y_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ ReadyD^{**}(y, R_2(x, y), y_0) \leftarrow \textbf{\textit{true}},\ R_1(x, y) \leftarrow \textbf{\textit{false}}\} \vee E). \quad (8)$$

Остальные выражения L_1 (1) и L_4 (4) имеют прежний вид, так как они не используют описание широковещательной передачи данных.

Результаты. Исследование метода повышения отказоустойчивости вычислительных кластеров показало, что использование статистических моделей, построенных на основе логико-алгебраических формализаций, позволяет получать основные характеристики для оценки производительности и чувствительности к отказам вычислительных кластеров. При определенных допущениях возможно оценивать некоторые характеристики вычислительных кластеров на основе обычных вероятностных расчетов, что позволит также оценить достоверность результатов статистического моделирования. Предлагается метод повышения отказоустойчивости вычислительных кластеров, основанный на комбинировании использования статистических и вероятностных моделей. Метод был ранее проиллюстрирован примерами и основан на первоначальном выборе работоспособных узлов кластера, определении необходимого числа узлов для выполнения распараллеленных вычислений в виде одинаковых и независимых друг от друга подзадач. Если после отбора узлов оказалось, что их числа недостаточно для параллельного выполнения всего вектора подзадач, то выполняется его часть, а остальные части выполняются на следующем шаге. Метод «работоспособен» и при сильной деградации кластера, вызванной различными причинами. Вычисления доводятся до конца, даже если при деградации кластера останется всего один рабочий узел. Естественно, время решения задачи при этом увеличивается.

Статистическая модель построена на основе использования логико-алгебраической исполнимой модели, то есть на основе выражений (1), (2), (3) и (4) и включает также 4 этапа их применения, описанные ранее.

При использовании вероятностной модели принято допущение, что все вычислительные узлы кластера, предоставляемые для решения задачи пользователя, одинаковы и находятся в одинаковых условиях эксплуатации. Для работы в составе кластера «заявлены» r рабочих узлов из n ($n > r$), предоставленных пользователю; ($n - r$) узлов – резервные. Каждый узел находится в работоспособном состоянии с вероятностью p; для оценки вероятности обнаружения k ($k = 1, 2, \ldots, n$) работоспособных узлов из общего их числа n

можно воспользоваться известной формулой Бернулли (9) для биномиального распределения вероятностей [28]:

$$f(k; n, p)=P(X=k)=C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \quad (9)$$

где $C_n^k=n!/(n-k)!k!$ – биномиальный коэффициент.

Кумулятивная функция биномиального распределения вероятностей (10) позволяет определить вероятность того, что число отказавших узлов вычислительного кластера не будет превышать величины k [28]:

$$F(k; p, n) = P(X \le k) = \sum_{i=0}^{k} C_n^i p^i (1-p)^{(n-i)}. \quad (10)$$

Математическое ожидание случайной величины, имеющей биномиальное распределение, равно $m = n \cdot p$, а дисперсия равна $\sigma^2 = n \cdot p \cdot (1-p)$.

Статистическая модель работы вычислительного кластера, построенная на основе выражений (1), (2), (3) и (4), проверялась путем вычисления некоторых ее характеристик на основании формулы (10) и далее произведена проверка некоторых основных характеристик на соответствие. В таблице 3 приведены значения следующих характеристик (всего узлов $n = 22$; из них заявлены рабочими $r = 16$):

p – коэффициент готовности узла кластера к работе;

m^* – оценка математического ожидания числа работоспособных узлов в кластере, вычисленная по результатам статистического эксперимента;

m – математическое ожидание числа работоспособных узлов в кластере, вычисленное по формуле $m = n \cdot p$;

q_{15} – вероятность, вычисленная по формуле (10) при n= 22, k=15 и при заданном в таблице значении p, того, что число рабочих узлов будет меньше, или равно 15.

Последний параметр q_{15} – это вероятность того, что для решения задачи обработки данных в параллельном режиме потребуется два временных интервала $T_{Обр.}$, так как $r > k$. Однако при малых значениях q_{15} вероятность того, что время обработки займет один временной интервал $T_{Обр.}$, будет намного выше. В последней колонке таблицы 3 указано число необходимых интервалов при заданных p, n = 22 и r = 16.

Таблица 3 – Характеристики эффективности кластера при n = 22 и r = 16

p	m*	m	q_{15}	$T_{Обр.}$(c)
0,4	8,77	8,8	0,9981	2
0,5	10,99	11,0	0,9738	2
0,6	13,17	13,2	0,8416	2
0,7	15,38	15,4	0,5058	2
0,8	17,60	17,6	0,1329	1
0,9	19,78	19,8	$0{,}4390 \cdot 10^{-2}$	1
0,95	20,88	20,9	$0{,}6835 \cdot 10^{-4}$	1
0,99	21,77	21,78	$0{,}1495 \cdot 10^{-8}$	1
0,999	21,97	21,98	$0{,}1680 \cdot 10^{-15}$	1
0,9999	22,0	22,0	0,0…	1
1	22,0	22	0	1

Например, при p = 0,8 вероятность q_{15} того, что время решения задачи займет 2 или более временных интервалов $T_{Обр.}$ равна 0,1329. Вероятность же того, что при заданных значениях p и q_{15} время обработки составит один интервал $T_{Обр.}$, равна $(1 - q_{15}) = 0{,}8671$. При дальнейшем увеличении коэффициента готовности p вероятность $(1 - q_{15})$ того, что время обработки составит величину одного интервала $T_{Обр.}$, приближается к единице. Значения m^* и m очень близки, что указывает на достоверность результатов статистического моделирования, при котором могут быть определены также и другие характеристики производительности и отказоустойчивости кластера.

В таблице 4 приведены аналогичные результаты для вычислительного кластера с большим числом рабочих r = 128 и $(n - r)$ = 22 резервных узла (всего узлов n = 150). Эти результаты иллюстрируют масштабируемость разработанных моделей в широких пределах.

Таблица 4 – Характеристики эффективности кластера при n = 150 и r = 128

p	m*	m	q_{127}	$T_{Обр}$(c)
0,4	60,0	60	1,0	2
0,5	75,0	75	1,0	2
0,6	90,0	90	1,0	2
0,7	105,05	105	1,0	2
0,8	120,09	120	0,94	2
0,9	135,0	135	0,0256	1
0,99	148,5	148,5	0,0…	1
0,999	149,85	149,85	0,0…	1
1	150	150	0	1

Обсуждение. В результате подтверждена достоверность предлагаемых моделей на основе логико-алгебраических выражений. К положительным особенностям предложенного метода обеспечения повышенной отказоустойчивости вычислительных кластеров относятся следующие:

– предложенные логико-алгебраические модели, соответствуют их назначению для использования в качестве формализованных спецификаций при разработке функциональной архитектуры вычислительных систем кластерного типа;

– применение предложенного метода оценки и реализации вычислительных систем кластерного типа позволяет добиться повышения их отказоустойчивости;

– согласование статистических имитационных моделей с логико-алгебраическими исполнимыми моделями позволило обеспечивать масштабируемость создаваемых моделей, позволяющую получать характеристики производительности и отказоустойчивости как вычислительных кластеров так и распределенных грид-систем;

– разработанные модели носят исполнимый, операционный и событийный характер, что позволяет учитывать функциональную архитектуру

вычислительных систем кластерного типа;

– ограниченность моделей и принятые допущения не противоречат реальным вариантам использования большинства из распространенных вычислительных кластеров и других волонтерских вычислительных систем.

Выводы. Неработоспособность и ограниченная работоспособность рабочего кластера может быть вызвана как относительно редкими отказами оборудования, так и перегрузками, вызванными фоновыми и волонтерскими задачами. Успешное решение проблемы повышения отказоустойчивости и работоспособности вычислительных кластеров программными средствами связана с возможностями пользователей и собственников кластеров по созданию и обслуживанию резерва аппаратных средств, а также по созданию отказоустойчивых приложений. Предложенные логико-алгебраические исполнимые модели функциональной организации вычислительных кластеров повышенной отказоустойчивости являются масштабируемыми и, соответственно, являются масштабируемыми и реализуемыми отказоустойчивые приложения, поэтому предложенные модели возможно модифицировать для создания на их основе работоспособных распределенных грид-систем и волонтерских метакомпьютеров.

В основу создания отказоустойчивых и работоспособных функциональных архитектур кластерных и грид вычислительных систем целесообразно положить подход, основанный на формализованных спецификациях, которыми являются исполнимые операционные модели, в основном соответствующие известным родственным концепциям: разработке, управляемой моделью (*MDD – Model-Driven Development*); архитектуре приложения, управляемой моделью (*MDA – Model-Driven Architecture*), и разработке архитектуры приложений на основе правил предметной области (*DDA – Domain-Driven Architecture*).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Parallel Computing and Its Modern Uses. URL: https://www.hp.com/gb-en/shop/tech-takes/parallel-computing-and-its-modern-uses/.

2. Parallel Computing Toolbox. Performs parallel computations on multi-core computers, GPUs, and clusters MathWorks. URL: https://www.mathworks.com/products/parallel-computing.html.

3. Производительность сети Folding@Home стала выше, чем у всех суперкомпьютеров, вместе взятых. URL:https://boinc.ru/novosti/proizvoditelnost-seti-foldinghome-stala-vyshe-chem-u-vseh-superkompyuterov-vmeste-vzyatyh/.

4. Российские распределенные вычисления. URL: russia/russian_clusters/Российские распределенные вычисления/.

5. Метакомпьютинг: параллельные вычисления в России. URL: https://parallel.ru/.

6. Grid computing. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Grid_computing/.

7. Вычисления для науки. URL: https://boinc.berkeley.edu/.

8. Кластер (группа компьютеров). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кластер_(группа_компьютеров)/.

9. Что такое вычислительные кластеры и как они работают? URL:https://serverflow.ru/.

10. Koren I., Krishna C.M. Fault-Tolerant Systems. Publisher Morgan Kaufmann. 2020. – 416 p.

11. How to deploy a fault tolerant cluster with continuous or high availability. URL: https://www.howtoforge.com/tutorial/how-to-deploy-a-fault-tolerant-cluster-with-continuous-or-high-availability/.

12. Peterson B. vROps Cluster Architecture: Stand-Alone, HA, and CA. May 7, 2022. URL: https://www.brockpeterson.com/post/vrops-cluster-architecture-ha-and-ca/.

13. Flinders M., Smalley I. What is high availability? July 29, 2024. URL:https://www.ibm.com/think/topics/high-availability/.

14. Failure Detection and Recovery in Distributed Systems. August 05, 2024. URL: https://www.geeksforgeeks.org/computer-networks/failure-detection-and-recovery-in-distributed-systems/.

15. Algorithm-Based Fault Tolerance Techniques. URL: https://www.nlafet.eu/wp-content/uploads/2016/01/NLAFET-D6.6-171031.pdf. NLAFET Consortium, 2015-2018. – 28 p.

16. Chinnaiah M., Niranjan N. Fault tolerant software systems using software configurations for cloud com-puting // Journal Cloud Comp. Vol. 7, No. 1 2018. – P. 1-17. https://doi.org/10.1186/s13677-018-0104-9.

17. Петушков Г.В. Методика анализа надежности и мониторинга функционирования вычислительных систем. Известия Юго-Западного государственного университета. 2025;29(1):155-172. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-155-172.

18. MAC Ethernet Medium access control. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Medium_access_control/.

19. InfiniBand. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/InfiniBand/.

20. Myrinet. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Myrinet/.

21. Ангара (интерконнект). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ангара_(интерконнект)/.

22. Алгеброалгоритмические модели и методы параллельного программирования / Андон Ф. И., Дорошенко А.Е., Цейтлин Г.Е., Яценко Е.А. Академпериодика, 2007. – 634 с.

23. Многоуровневое структурное проектирование программ. Теоретические основы, инструментарий/ Е.Л. Ющенко, Г.Е. Цейтлин, В.П. Грицай, Т.К. Терзян. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 208 с.

24. Gurevich Y. Abstract State Machines: An Overview of the Project // Foundations of Information and Knowledge Systems. Lect. Notes Comput. Sci., vol. 2942, 2004. – P. 6-13.

25. Зинкин С.А. Элементы новой объектно-ориентированной технологии для моделирования и реализации систем и сетей хранения и обработки данных // Информационные технологии. – М.: 2008. – № 10. – С. 20-27.

26. Волчихин В.И., Зинкин С.А. Логико-алгебраические модели и методы в проектировании функциональной архитектуры распределенных систем хранения и обработки данных // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. 2012. – № 2. – С. 3-16.

27. Зинкин С.А. Интеллектуализация и интеграция систем и сетей хранения и обработки данных. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2023. – 416 с.

28. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х томах. Т. 1. М: Мир, 1984. – 528 с.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.02
EDN: NNSGYD

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ *RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION* ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 8814-1490
AuthorID: 1286639
ORCID: 0000-0001-5995-7526

ВОРОБЬЕВ Никита Григорьевич, аспирант
Московский политехнический университет
(107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38, e-mail: nickikta@yadnex.ru)

Аннотация. Целью работы является применение графовых моделей для повышения эффективности диалоговых систем. В статье представлена разработка системы мониторинга и анализа сетевой инфраструктуры на основе методов *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*) и больших языковых моделей (*LLM*). Актуальность исследования обусловлена возрастающей сложностью *IT*-систем и необходимостью оперативного доступа к технической документации для сетевых администраторов. В работе проведен сравнительный анализ архитектур *RAG*, *CAG* и *Agentic*. Рассматривается реализация агентной логики, обеспечивающей адаптивный поиск и генерацию контекстно-релевантных ответов. Произведено тестирование системы на датасете технической документации. Разработанное решение демонстрирует практическую значимость для автоматизации рабочих процессов, повышения производительности и обеспечения безопасности данных за счет локального исполнения Проведено сравнение разработанной системы с актуальными генеративными моделями. Для повышения точности аналитики была проведена экспертная оценка результатов. Проведенный анализ доказывает эффективность применения графовых моделей для хранения и использования локальных контекстов.

Ключевые слова: *Retrieval-Augmented Generation*, большие языковые модели, сетевая инфраструктура, мониторинг, анализ данных, агентная архитектура, техническая документация, компьютерная лингвистика, автоматизация, информационная безопасность.

THE USE OF *RETRIEVAL-AUGMENTED GENERATION* METHODS FOR AUTOMATING NETWORK INFRASTRUCTURE ANALYSIS

© The Author(s) 2025
VOROBYEV Nikita Grigorievich, post-graduate student
Moscow Polytechnic University
(107023, Russia, Moscow, 38 Bolshaya Semyonovskaya str., e-mail: nickikta@yadnex.ru)

Abstract. The aim of this work is to apply graph-based models to improve the efficiency of dialogue systems. The paper presents the development of a network infrastructure monitoring and analysis system based on *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*) methods and large language models (*LLMs*). The relevance of the study is driven by the increasing complexity of *IT* systems and the need for network administrators to have prompt access to technical documentation. The study conducts a comparative analysis of *RAG, CAG*, and *Agentic* architectures. It explores the implementation of agentic logic that enables adaptive search and the generation of contextually relevant responses. The system was tested on a technical documentation dataset. The developed solution demonstrates practical value in automating workflows, enhancing productivity, and ensuring data security through local execution. A comparison was made between the proposed system and state-of-the-art generative models. To improve analytical accuracy, an expert evaluation of the results was conducted. The analysis confirms the effectiveness of using graph-based models for storing and utilizing local contexts.

Keywords: *Retrieval-Augmented Generation*, Large Language Models, network infrastructure, monitoring, data analysis, agent architecture, technical documentation, computer linguistic, automation, information security.

Для цитирования: *Воробьев Н.Г. Применение методов Retrieval-Augmented Generation для автоматизации анализа сетевой инфраструктуры / Н.Г. Воробьев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 65-69. – EDN: NNSGYD.*

Введение. Современные *IT*-системы характеризуются высокой эффективностью, что повышает требования к скорости и точности обработки технической информации. Сетевые администраторы сталкиваются с необходимостью оперативного доступа к актуальной документации, настройке оборудования и устранению неисправностей, что требует значительных издержек. Традиционные методы поиска и анализа данных зачастую неэффективны, особенно в условиях быстро меняющихся технологий и растущего объема специализированных знаний. В этой связи актуальной задачей становится разработка интеллектуальных систем, способных автоматизировать процессы

обработки запросов и предоставления релевантной информации [1].

Одним из перспективных направлений в данной области является использование больших языковых моделей (*LLM*) [2] в сочетании с методами *Retrieval-Augmented Generation* (*RAG*). Подход *RAG* позволяет дополнять генеративные модели внешними источниками данных [3], что повышает точность и достоверность ответов. Однако большинство существующих решений полагаются на облачные сервисы, что создает риски, связанные с конфиденциальностью данных и зависимостью от внешней инфраструктуры. В связи с этим особый интерес представляет разработка локальных систем, обеспечивающих безопасность и автономность работы.

Целью данной работы является создание виртуального ассистента для сетевых администраторов на основе архитектуры *Agentic RAG* [4], объединяющей преимущества генеративных моделей и адаптивного поиска информации. В исследовании решаются следующие задачи:

1. Анализ современных методов взаимодействия с языковыми моделями, включая *RAG, CAG* и их модификации.
2. Обоснование выбора инструментов и технологий для локального развертывания системы.
3. Разработка веб-приложения с контейнеризацией для обеспечения стабильности и масштабируемости.
4. Реализация агентной логики, позволяющей динамически уточнять запросы и оптимизировать поиск релевантных данных;
5. Тестирование системы на реальных данных для оценки точности и эффективности.

Методология. В исследовании применялся комплексный подход, сочетающий теоретический анализ современных архитектур обработки естественного языка (*RAG, CAG* и *Agentic RAG*) с практической разработкой программного решения. Для реализации системы выбран технологический стек на основе *Golang* [5], *PostgreSQL* [6], *LangChain* [7] и локально развернутой модели *Llama* 3.1 [8] через *Ollama*. Разработан конвейер обработки данных, включающего очистку текста, токенизацию *BPE*, векторизацию *nomic-embed-text* и семантический поиск [9], а также созданию системы специализированных агентов для классификации запросов, анализа метрик и генерации ответов.

Методология тестирования включала функциональную проверку на датасете технической документации (1804 страницы) с экспертной оценкой качества ответов по критериям информативности, лаконичности и практической применимости. Для обеспечения воспроизводимости использованы контейнеризация *Docker*, документация *Swagger*, система логирования *Logrus* и версионный контроль [10].

Такой подход позволил создать автономную и защищенную систему, демонстрирующую высокую эффективность в решении задач сетевого администрирования при сохранении конфиденциальности данных за счет локального исполнения.

Результаты. Архитектура *Agentic RAG* представляет собой систему обработки запросов пользователей, состоящую из агентного графа [11] и генеративной части, используемой для повышения релевантности ответов. В этом исследовании обработка запросов структурируется графовым методом, а затем, основываясь на языковой модели и векторном поиске, формируется ответ системы. Далее будет представлено более подробное описание алгоритма.

На рисунке 1 представлен агентный граф, направленный, но ациклический. Такой подход позволяет обеспечить детерминированную обработку.

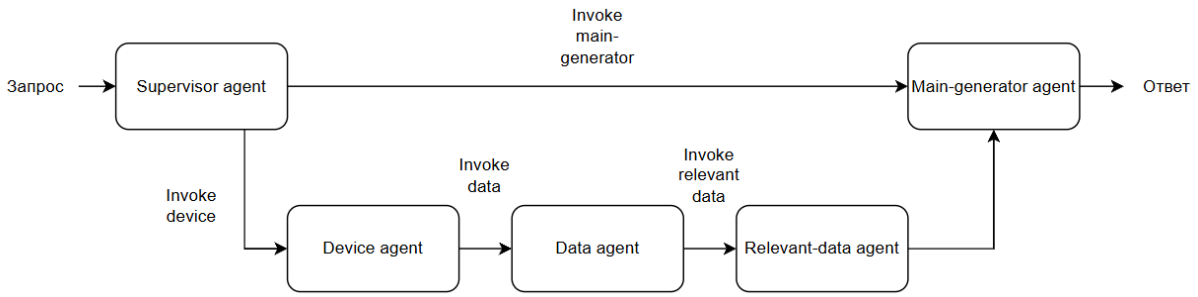


Рисунок 1 – Агентный граф

Запрос поступает в систему через агента *supervisor-agent,* который анализирует запрос пользователя и делегирует задачи другими агентам. Граф задается следующими ребрами: от *supervisor-agent* к *device-agent* и *main-generator-agent,* от *device-agent* к *data-agent*, от *data-agent* к *relevant-data-agent*, и от *relevant-data-agent* к *main-generator-agent*, который завершает выполнение.

Точка входа: *supervisor-agent.* Агент *supervisor-agent* выступает оркестратором, анализируя запрос пользователя и определяя, какие инструменты или агенты необходимы. Системные промпты, встроенные в его логику, задают правила анализа, например, поиск ключевых слов, связанных с

сетевыми устройствами. Если запрос содержит такие элементы, как имена устройств (например, "*RouterA*" или "*SwitchB*"), агент добавляет в историю сообщений команду для вызова соответствующего инструмента. Переходы из *supervisor-agent*:

1. К *device-agent*: если запрос требует извлечения специфической информации, например имен сетевых устройств, управление передается *device-agent.*

2. К *main-generator-agent:* для общих запросов, не требующих специализированной обработки, управление передается напрямую генеративному агенту.

Переход из *supervisor-agent* к *device-agent*. Агент *device-agent* извлекает информацию, связанную с сетевыми устройствами, упомянутыми в запросе, используя инструменты, такие как регулярные выражения или модели *NLP* [12] для распознавания сущностей. Например, для запроса "Как настроить *RouterA* и *SwitchB*?" агент извлекает имена "*RouterA*" и "*SwitchB*" и добавляет их в историю сообщений. Переход из *device-agent* к *data-agent*: извлеченные данные передаются агенту `*data-agent*` для поиска связанной информации в базе знаний.

Переход из *device-agent* к *data-agent.* Агент *data-agent* взаимодействует с базой знаний, содержащей документы о сетевых устройствах, их конфигурациях и характеристиках. Запрос, основанный на данных от `*device-agent*` (например, имена устройств), преобразуется в векторное представление $E(q_d) \in R^d$, где (d) – размерность пространства эмбеддингов. База знаний [13] представлена набором векторов $D = \{d_1, d_2, ..., d_n\}$, где каждый $d_i \in R^d$– эмбеддинг документа. Поиск релевантных документов выполняется с использованием косинусной близости:

$$\text{cosine_sim}(E(q_d), d_i) = \frac{E(q_d) \cdot d_i}{|E(q_d)|\,|d_i|} \quad (1)$$

где $E(q_d) \cdot d_i$ – скалярное произведение векторов, а $|E(q_d)|$ и $|d_i|$ – евклидовы нормы векторов (вычисляются как квадратный корень из суммы квадратов всех компонентов вектора). Агент выбирает документы с наивысшей близостью, формируя набор потенциально релевантных данных. Переход из *data-agent* к *relevant-data-agent*. Найденные документы передаются для фильтрации.

Переход из *data-agent* к *relevant-data-agent*. Агент *relevant-data-agent* выполняет реранжирование и фильтрацию, используя перекрестный энкодер [14], чтобы оценить семантическую релевантность [15] документов. Реранжирование описывается формулой:

$$score\,(q, d_i) = f_{encoder}(q, d_i) \quad (2)$$

в которой $f_{encoder}$ обозначает скалярное значение релевантности. Далее формируется подмножество $D_k \subset D$, содержащее наиболее релевантные документы.

Из *relevant-data-agent* к *main-generator-agent* передаются выбранные документы для генерации ответа.

Затем агент *main-generator-agent* объединяет пользовательский запрос q, историю сообщений h и выбранные документы D_k, формирует локальный контекст $C=[q, h, D_k]$. Ответ генерируется моделью-трансформером r [16], максимизируя вероятность:

$$r = arg\ maxP(r|\ C;\ \theta) \quad (3)$$

где θ – заданные параметры модели. Паттерн ответа может быть отрегулирован с помощью промптов, к примеру, жестко требуя упоминания задействованных в ответе устройств.

В *main-generator-agent* происходит интеграция генеративной модели и графа. Пользовательский запрос формализуется в вектор $E(q) \in R^d$, происходит сравнение с заданными векторами базы данных для извлечения документов. Затем выбранные документы D_k объединяются с историей сообщений. Модель обрабатывает собранный локальный контекст C [17]. Граф обеспечивает пошаговую обработку за счет использования истории запросов.

Таким образом, архитектура *Agentic RAG* объединяет структурированный граф агентов для обработки запроса и генеративную часть для создания ответа, обеспечивая точность и релевантность за счет векторного поиска [18] и системных промптов.

Производительность системы. Измерение времени отклика показали следующие результаты:

1. Среднее время обработки запросов до 5 слов: 5-8 секунд.

2. Среднее время обработки запросов более 5 слов: 20-30 секунд.

3. Время поиска в векторной базе данных: 120-400 мс в зависимости от объема индексированных данных.

Система продемонстрировала стабильную работу при одновременной обработке до 15 запросов в минуту без существенного снижения производительности. Нагрузочное тестирование показало, что даже при 100% загрузке системы время отклика не превышало 45 секунд.

Экспериментальное подтверждение эффективности. В дополнение к техническим тестам было проведено анкетирование среди 12 сетевых администраторов, которые в течение двух недель использовали систему в своей работе. По итогам тестирования:

1. 92% респондентов отметили, что система экономит их время при поиске технической информации.

2. 85% оценили точность ответов как "релевантную".

Наиболее ценными функциями, по мнению пользователей, оказались:

1. Возможность анализа метрик оборудования.

2. Пошаговые инструкции по устранению неполадок.

3. Интеграция с технической документацией.

4. Возможность пополнения системы локальными данными.

В исследовании проведено сравнение разра-

ботанной системы с аналогами (*Llama* 3.1:8*b*, *Grok, DeepSeek* [19]) по двум направлениям: предоставление справочной информации и анализ метрик сетевых устройств. В первом сценарии система показала точность 92%, превосходя аналоги (85-89%), демонстрируя более полные ответы с пошаговыми инструкциями. Например, при настройке статического *IP*-адреса она включала проверку текущих настроек, что отсутствовало у конкурентов.

При анализе метрик оборудования система корректно выявляла 95% аномалий (против 88-91% у аналогов, участвовавших в исследовании) и предлагала конкретные решения. Для случая с высокой загрузкой *HDD* (82,4%) были даны чёткие рекомендации: дефрагментация и проверка *SMART*-статуса, тогда как другие модели ограничились общими советами. Время обработки запросов составило 2,1 секунды, что на 15% быстрее ближайшего конкурента (*DeepSeek* – 2,5 секунды).

Особое преимущество системы проявилось в обработке сложных запросов, таких как устранение *CRC*-ошибок. Точность рекомендаций достигла 98% (против 90-93% у аналогов), благодаря оптимизированным алгоритмам анализа структурированных данных. Это обеспечило не только высокую скорость, но и адаптивность к разнообразным сетевым проблемам.

Результаты подтверждают преимущество системы в точности (на 5-7%), полноте (на 10-12%) и скорости (на 15%). Её применение позволит оптимизировать ключевые задачи сетевого администрирования, сократив время на диагностику и устранение неполадок. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение функциональности и интеграцию с другими платформами.

Полученные результаты свидетельствуют, что разработанная система на основе архитектуры *Agentic RAG* с локальным развертыванием представляет собой эффективный инструмент для поддержки работы сетевых администраторов, сочетающий высокую точность ответов с приемлемой производительностью. Особенно важно отметить успешную реализацию механизма анализа и диагностики сетевых проблем, что существенно расширяет возможности системы по сравнению с традиционными решениями на основе *RAG*.

Обсуждение. Разработанная система на основе архитектуры *Agentic RAG* продемонстрировала эффективность по сравнению с традиционными *RAG*-решениями. Этот результат достигнут благодаря графовой системе специализированных агентов, механизму итеративного уточнения запросов и глубокой обработке технической терминологии. Особенно ценным является сочетание анализа метрик оборудования с обработкой естественного языка, позволяющее не только извлекать информацию, но и выявлять сложные причинно-следственные связи в работе сетевых устройств.

В статье [20] рассматривается разработка графовой *RAG*-системы (*Retrieval-Augmented Generation*) для работы с цифровым правом Российской Федерации, в частности, с законами 149-ФЗ и 152-ФЗ. Авторы анализируют недостатки больших языковых моделей, к примеру, выделяются "галлюцинации". Делается вывод об эффективности альтернативного применения *GraphRAG*, за счет того, что в нем используются графовые структуры, моделирующие контекст и связи между фрагментами документов. Дается заключение о более высокой эффективности при практическом применении.

Рассматриваемое исследование в первую очередь фокусируется на юридической предметной области, в отличии от данного исследования. Тем не менее, система оценивания эффективности может быть эффективно переиспользована для оптимизации работы предложенного метода. При этом заметна общая тенденция на повышение значимости контекстуальных связей для повышения точности.

Выводы. Проведённое исследование подтвердило эффективность применения архитектуры *Agentic RAG* для создания интеллектуального ассистента сетевого администратора. Разработанная система демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными подходами, обеспечивая не только быстрый доступ к технической документации, но и комплексный анализ состояния сетевой инфраструктуры. Ключевым достижением работы стало успешное сочетание семантического поиска, генерации контекстно-зависимых ответов и диагностики сетевых проблем в едином решении.

Особую ценность представляет реализация системы с локальным исполнением, обеспечивающая как высокий уровень безопасности данных, так и приемлемую производительность. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшего развития системы, включая интеграцию с системами мониторинга в реальном времени и расширение функциональности за счёт обработки мультимодальных данных. Практическая значимость работы подтверждается положительными результатами тестирования, свидетельствующими о реальной возможности сокращения временных затрат администраторов на поиск информации и устранение неисправностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Фахрутдинова Диана Фаилевна, Федорова Ольга Валентиновна. «Автоматизация документооборота на малом предприятии» // Наука, техника и образование. – 2020. – №11. – С. 25-27.

2. Д.Е. Намиот, and Е.А. Ильюшин. «Архитектура LLM агентов» // International Journal of Open Information Technologies, vol. 13. – 2025. – №1. – С. 67-74.

3. Шмат Алексей Вячеславович. «Применение больших языковых моделей и технологии Retrieval-Augmented Generation для корпоративных ассистентов» // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №10. – С. 720-726.

4. Mozharovskii Evgenii Evaluating Retrieval-Augmented

Generation (RAG) techniques in enhancing LMS for coding tasks // Universum: технические науки. – 2024. – №6 (123). – С. 22-26.

5. Д.А. Хайруллин, К.Е. Чиркова, М.Р. Богданов Эффективные паттерны конкурентного программирования в Golang // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – №5-1 (104). – С. 355-360.

6. А.И. Платонова Сравнение производительности PostgreSQL и ее расширения TimescaleDB // Современные инновации, системы и технологии. – 2024. – №3. – С. 0121-0333.

7. Д.Е. Намиот, Е.А. Ильюшин Архитектура LLM агентов // International Journal of Open Information Technologies. – 2025. – №1. – С. 67-74.

8. Mikhail Tikhomirov, Daniil Chernyshev Facilitating Large Language Model Russian Adaptation with Learned Embedding Propagation // Journal of Language and Education. – 2024. – №4 (40). – С. 130-145.

9. Н.Д. Шалагин Обзор алгоритмов семантического поиска по текстовым документам // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – №9. – С. 11-21.

10. Медаев Марк Казбекович Тестирование API // E-Scio. – 2023. – №5 (80). – С. 118-123.

11. Силютин Д.С. «Агентно-ориентированный подход к управлению генетическим поиском подстановки изоморфизма графов» Известия Южного федерального университета. Технические науки, vol. 31. – 2003. – №2. – С. 134-139.

12. Murodov Sh.A. Working with Python's NLP libraries // Экономика и социум. – 2024. – №6-2 (121). – С. 430-432.

13. Максименко Александр Николаевич, Костылева Валентина Владимировна, Разин Игорь Борисович Подходы к преобразованию реляционных баз данных в базы знаний // International journal of professional science. – 2021. – №3. – С. 55-62.

14. Трофимов Игорь Владимирович О декомпозиции метода построения энкодера языковой модели // Программные системы: теория и приложения. – 2023. – №1 (56). – С. 31-54.

15. Дмитрий Владимирович Зайцев Аргументативное следование, немонотонность и релевантность // Логические исследования. – 2025. – №1. – С. 110-129.

16. Узких Г.Ю. Применение трансформеров в обработке естественного языка // Вестник науки. – 2024. – №8 (77). – С. 186-189.

17. Первухина С.В. Осознанность контекста в электронном формате диалога // Вестник Самарского университета. История, педагогика, филология. – 2023. – №1. – С. 181-187.

18. Лебедев Сергей Анатольевич Использование аппарата теории выбора на итерациях поиска в численных векторных схемах // Вестник ВИ МВД России. – 2008. – №1. – С. 99-103.

19. Дарья Александровна Королькова Программы искусственного интеллекта и их классификация: гражданско-правовой подход // Закон и право. – 2024. – №8. – С. 146-152.

20. Жаров В.В., and Сараев П.В. «Создание графовой RAG-системы по цифровому праву Российской Федерации» Вестник науки, vol. 1. – 2025. – №6 (87). – С. 1395-1414.

Настоящее исследование проведено при финансовой поддержке Московского Политехнического Университета в рамках гранта имени В.Е. Фортова.

Статья поступила в редакцию 17.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.032.26
EDN: QACLNY

ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ НАБОРА ДАННЫХ И ЕГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ В ЗАДАЧАХ ОБУЧЕНИЯ СВЁРТОЧНЫХ СИАМСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО АЭРОФОТОСЪЕМКЕ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3897-5570
AuthorID: 496097
ORCID: 0000-0002-2984-4480
ScopusID: 56052044700

КОСТРОВ Борис Васильевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет им В.Ф.Уткина
(390005, Россия, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e -mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)

SPIN: 2166-8121
AuthorID: 722169
ORCID: 0000-0001-5829-8223
ScopusID: 57191847844

БАБАЕВ Сергей Игоревич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет им В.Ф.Уткина
(390005, Россия, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e -mail: babaev.s.i@gmail.com)

SPIN: 9234-4483,
AuthorID: 952662
ORCID: 0009-0007-4358-7736
ScopusID: 57211426640

ТАРАСОВА Валентина Юрьевна, старший преподаватель кафедры «Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет им В.Ф.Уткина
(390005, Россия, Рязань, ул. Гагарина, 59/1, e -mail: valentina2008.91@mail.ru)

Аннотация. Рассматриваются подходы к формированию набора исходных данных и обучения нейронной сети, инвариантной к проективным искажениям, на основе модифицированной сверточной нейронной сети *VGG*16. Сравнение пары изображений, полученных с разных сенсоров, с использованием данной нейронной сети позволило выделить один и тот же объект на них. В качестве исходных данных используется база данных (БД) с изображениями подстилающей поверхности, разбитой на фрагменты (тайлы). Задача поиска одного и того же объекта на паре изображений усложняется условиями съемки с разным масштабом, уголком наклона сенсора, дефектами камеры, например, дисторсия объектива. На основе фрагмента съемки на небольшой высоте выполняется поиск в БД, изображения, на котором представлен тот же объект (водоем, дорога, линии электропередач, лес) в окрестностях заданного маршрута. Поиск осуществляется на основе вектора признаков изображения, который формируется на последнем слое разработанной сверточной нейронной сети (СНС). Данный подход позволяет определить в какой части карты был выполнен снимок, определить положение летательного аппарата по месту аэрофотосъемки, оценка точности поиска производится на основе *GPS*-трека ЛА. В результате обучения предлагаемой нейронной сети удалось достичь приемлемой точности работы предложенного алгоритма.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть *VGG*16, сиамские нейронные сети, обучение нейронных сетей, вектор признаков изображений, спектральное преобразование Уолша, определение места аэрофотосъемки.

ISSUES TO THE DATA SET FORMATION AND PREPROCESSING IN THE TRAINING CONVOLUTIONAL SIAMESE NEURAL NETWORKS TASKS FOR AN AIRCRAFT POSITION CORRECTING BASED ON AERIAL PHOTOGRAPHY

© The Author(s) 2025

KOSTROV Boris Vasilyevich, doctor of technical sciences, professor,
head of the electronic computers department
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(*390005, Russia, Ryazan, Gagarina st., 59/1, e-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)*
BABAEV Sergey Igorevich, candidate of Technical Sciences,
associated professor of the electronic computers department
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(*390005, Russia, Ryazan, Gagarina st., 59/1, e-mail: babaev.s.i@gmail.com)*
TARASOVA Valentina Yurievna, senior lecturer at the electronic computers department

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(*390005, Russia, Ryazan, Gagarina st., 59/1, e-mail: babaev.s.i@gmail.com*)

Abstract. Issues to the initial data set formation and neural network invariant to projective distortions training based on a modified convolutional neural network *VGG*16 are considered. Comparing a pair of images obtained from different sensors using this neural network made it possible to identify the same object on them. An underlying surface images database divided into fragments (tiles) is used as the source data. The task of searching for the same object in a pair of images is complicated by photographing conditions with different scales, sensor tilt angle, and camera defects, such as lens distortion. Based on a fragment of a low-altitude survey, a search is performed in the database for an image showing the same object (reservoir, road, power lines, forest) in the vicinity of a given route. The search is performed based on the vector of image features, which is formed on the last layer of the developed convolutional neural network. This approach allows to determine which part of the map (tile) the image is contained, determine the aircraft position at the aerial photo location, and evaluate the search accuracy based on the aircraft *GPS* track. As a result of training the proposed neural network, it is possible to achieve acceptable accuracy of the proposed algorithm.

Keywords: convolutional neural network *VGG*16, Siamese neural networks, neural network training, image feature vector, spectral Wall transformation, aerial photography location determination.

Для цитирования: *Костров Б.В. Подходы к формированию набора данных и его предварительной обработки в задачах обучения свёрточных сиамских нейронных сетей для коррекции положения летательного аппарата по аэрофотосъемке / Б.В. Костров, С.И. Бабаев, В.Ю. Тарасова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 70-77. – EDN: QACLNY.*

Введение. Рассматривается алгоритм обучения сиамской нейронной сети, а также подготовка данных для обучения применительно к задаче определения места съемки на основе сравнения пары изображений, полученных с разнородных сенсоров: карты местности подстилающей поверхности и фрагменты со съёмки на небольшой высоте. Карта местности подстилающей поверхности имеет высокое разрешение и предварительно разбивается на фрагменты (тайлы) и записываются в БД. Рассматривается поход к составлению обучающей выборки, инвариантной к проективным искажениям, так как фрагменты со съёмки на небольшой высоте отличаются от тех, что находятся в БД. Для уменьшения размерности БД предлагается использовать тайлы, подверженные спектральному преобразованию с удалением информационной составляющей.

Методология. Для уменьшения размерности БД изображений предлагается использовать спектральное представление для карты местности подстилающей поверхности. По функциям Уолша можно производить разложение произвольных сигналов в ряд Уолша-Фурье, которые приминают всего два значения (+1 или -1), поэтому удобны для вычислений [1]. Спектральное преобразование Уолша использует три основные системы упорядочивания функций Уолша: систему Адамара (естественное упорядочивание), систему Пэли (диадическое упорядочивание) и систему Уолша (упорядочивание по частоте) [2, 3].

Функции Уолша в системе Пэли упорядочены по числу изменений знака, но в диадической (двоично-отражённой) последовательности, что делает их более удобными для анализа сигналов с резкими перепадами (например, в цифровых изображениях).

Преобразование Уолша в системе Пэли для дискретного сигнала $x[n]$ длины $N=2^m$ определяются следующим образом:

Прямое преобразование Уолша-Пэли:

$$X[k] = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n]\cdot Pal(k,n), \quad k = 0, 1, \ldots, N\text{-}1. \qquad (1)$$

Обратное преобразование Уолша-Пэли:

$$x[n] = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X[k]\cdot Pal(k,n), \quad n = 0, 1, \ldots, N\text{-}1. \qquad (2)$$

где $Pal(k, n)$ – функция Уолша-Пэли порядка k в точке n, $N=2^m$ – длина сигнала.

Функция Уолша-Пэли. Функция $Pal(k, n)$ определяется через произведение знаков Радемахера:

$$Pal(k,n) = \sum_{j=0}^{m-1} (Rad_j(n))^{k_j}, \qquad (3)$$

где k_j – j-й бит числа k в двоичном представлении, $Rad_j(n)$ – функция Радемахера порядка j:

$$Rad_j(n) = (-1)^{\left\lfloor \frac{n}{2^j} \right\rfloor}. \qquad (4)$$

Матричное представление (для N = 4). Матрица Уолша-Пэли $\boldsymbol{H}_4$ для $N = 4$:

$$\mathbf{H_4} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Карта местности подстилающей поверхности разбивается на тайлы размером 256x256. Спектр Уолша-Пэли вычисляется как:

$$H = H_{256} \cdot I \cdot H^T_{256}, \qquad (6)$$

где H – спектр Уолша-Пэли изображения I, H^T_{256} – транспонированная матрицу Уолша-Пэли [4].

Упорядочение по Уолшу группирует функции по числу нулей (пересечений) на интервале, что делает его более интуитивным для анализа сигналов [4].

Функция Уолша

$$Wal(k,n) = \sum_{j=0}^{m-1} (Rad_j(n))^{k_j(r)}, \qquad (7)$$

где $Wal(k, n)$ – функция Уолша порядка k в точке n, $N=2^m$ – длина сигнала, $k_j(r)$ – j-й бит в коде Грея числа r, который вычисляется как:

$$k_j(r)=k_j \oplus k_{j+1}, \qquad (8)$$

где k_j – *j*-й бит двоичного представления *k*.

Преобразование Уолша. Прямое преобразование:

$$X[k] = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x[n]\cdot Wal(k,n), \quad k = 0, 1, \ldots, N\text{-}1. \qquad (9)$$

Обратное преобразование:

$$x[n] = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X[k]\cdot Wal(k,n), \quad n = 0, 1, \ldots, N\text{-}1. \qquad (10)$$

Матричное представление (для N = 4). Матрица Уолша $\boldsymbol{W}_4$ для N = 4:

$$\mathbf{W_4} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}. \qquad (11)$$

Спектр Уолша для изображений. Для изображения *I* размером 256×256 спектр Уолша вычисляется аналогично (6).

Нейросетевой подход получения вектора признаков изображения. На основе нейросетевого подхода изображения преобразуются в вектор признаков. На рисунке 1 приведена модель разработанной СНС. Данная СНС – это модернизация существующей сети *VGG*16, которая применяется для задач классификации изображения. На последнем слое нейросети формируется некоторый вектор признаков достаточный для понимания того, какие объекты находятся на входном изображении [5].

В основе каждого блока – свёртка малым окном, подвыборка окном 2x2 (или 4x4 в верхних и нижних блоках) и активация *ELU*. Количество свёрточных блоков увеличивается от 8 до 32 к концу сети. В качестве завершающего слоя – *FCN*-слой с 256 нейронами-признаками.

Данная модель, в отличие от *VGG*16, использует *ELU* (*Exponential Linear Unit*) в качестве функции активации, что позволяет решить проблему затухающих нейронов, а также имеет меньшее количество свёрток, число которых у *VGG*16 является избыточным для решения данной задачи, а уменьшение количества свёрток к середине (песочные часы) позволяет лучше акцентировать внимание сети на высокочастотные составляющие изображения (что характерно для спутниковых изображений). Также, малое количество свёрток позволяет снизить вычислительную сложность и избежать переобучения на малых наборах данных.

Активационная функция *ELU* определяется следующей формулой:

$$ELU(z) = \begin{cases} z, & \text{если } z \geq 0 \\ \alpha(e^x - 1) & \text{если } z < 0 \end{cases} \qquad (13)$$

где *z* – входной сигнал, α (обычно $\alpha \geq 0$) – гиперпараметр, определяющий насыщение функции для отрицательных значений [6].

На вход нейронной сети может быть подано изображение различных цветовых моделей (например, *RGB*, *HSV*), изображение после вейвлет-преобразования, спектральное представление и д.р [7-10].

Входом нейронной сети является спектр, размером 256x256. В случае, если входное изображение имеет отличный от заданного размер, оно масштабируется. На рисунке 2 приведена пара изображений, полученная с разных сенсоров после применения обратного преобразования Уолша с усечением 75% значений. Алгоритм усечения значений в спектральной представлении рассмотрен в работе [11].

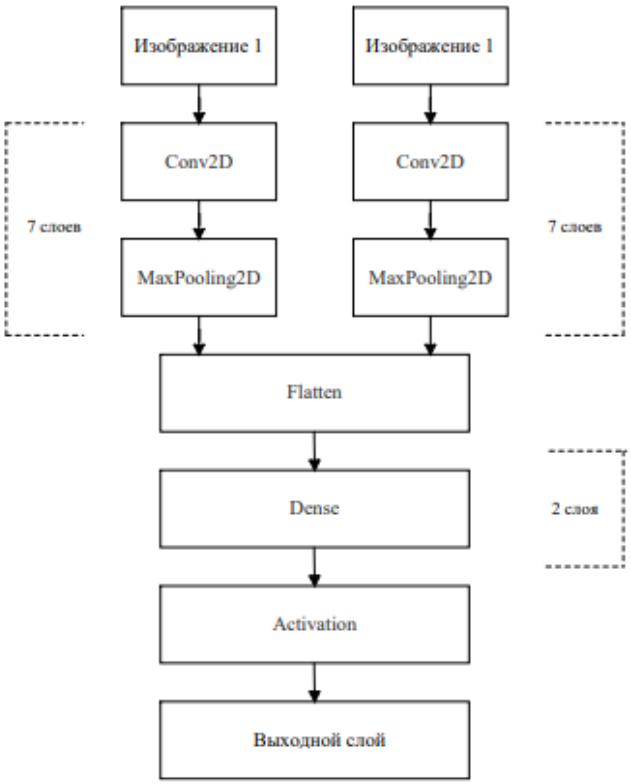


Рисунок 1 – Модель разработанной нейронной сети

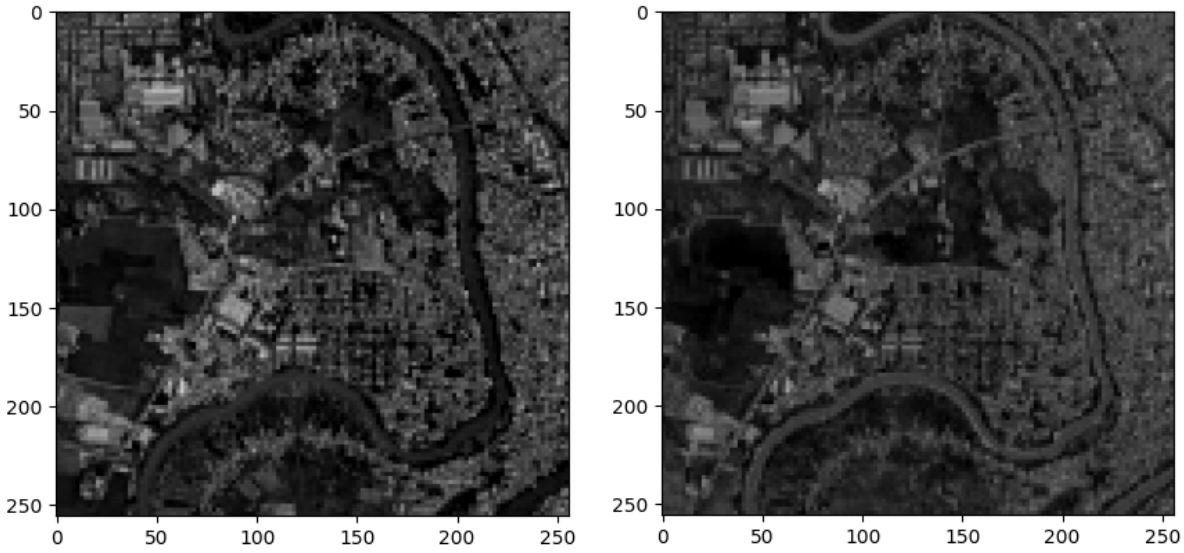


Рисунок 2 – Пара изображений после обратного преобразования Уолша

На рисунке 3 приведена структурная схема модуля вычисления сходства с использованием сиамских сетей. Так как на вход такой нейронной сети требуется два изображения, а выходе нужно сформировать численную оценку схожести, модернизированную модель *VGG16* расширяем до сиамской архитектуры.

Отдельную задачу представляет обучение подобной сети. Для ее решения данная сеть была дополнена парной, и в качестве последних слоев была добавлена функция вычисления косинусного расстояния (формула 14), чтобы в качестве выходной характеристики формировалась разница между парой изображений [12, 13]. Для обучения такой сети использовались сложные пары с целью корректного выделения всех возможных значимых характеристик.

Косинусное расстояние вычисляется по следующей формуле:

$$cosine_{\text{similar}}(A, B) = \frac{(A, B)}{||A|| \cdot ||B||}, \quad (14)$$

где (A, B) – скалярное произведение векторов A и B, $||A||$ – норма (длина) вектора A, вычисляемая как $\sqrt{\sum_{i=1}^{m} A_i^2}$, i – индекс суммирования, M – размер каждого из векторов A и B, $||B||$ – норма (длина) вектора B, вычисляемая аналогично.

Подобные парные нейронные сети возможно использовать для выделения закономерностей в исходных парах изображений для формирования характеристик, на основе которых в дальнейшем можно сравнивать эти изображения.

Все пары изображений, применяемые для обучения таких нейронных сетей, можно разделить на несколько классов:

– простые позитивные;
– простые негативные;
– сложные позитивные;
– сложные негативные [14].

Под *простой парой* (*Easy Pair*) будем понимать пару сравниваемых изображений, которые:

– правильно классифицируются текущей моделью;
– не требуют дообучения, так как ошибка на таких примеров → 0.

Под *сложной парой* (*Hard Pair*) будем понимать пару сравниваемых изображений, которые:

– трудно классифицировать текущей моделью;
– ошибочно принимаются за похожие, хотя имеют принадлежность к разным классам (*false positive*);
– ошибочно принимаются за различные, хотя принадлежат одному классу (*false negative*).

Пусть даны:

– Сиамская сеть с функцией расстояния $D(x_i, x_j)$,
– Порог τ, определяющий, считаются ли примеры похожими ($D < \tau$) или разными ($D \geq \tau$).

Тогда:

Простая позитивная пара (*Easy Positive*)

$$D(x_i, x_j) << \tau;$$
$$y_i = y_j. \quad (15)$$

Простая негативная пара (*Easy Negative*)

$$D(x_i, x_j) >> \tau;$$
$$y_i \neq y_j. \quad (16)$$

Сложная негативная пара (*Hard Negative*):

$$D(x_i, x_j) \approx \tau;$$
$$y_i \neq y_j. \quad (17)$$

Сложная позитивная пара (*Hard Positive*)

$$D(x_i, x_j) >> 0;$$
$$y_i = y_j. \quad (18)$$

где y_i – метка (класс) объекта x_i, y_j – метка (класс) объекта x_j [15].

Для обучения нейронной сети целесообразно применять следующие пары: простые позитивные, сложные позитивные и сложные негативные. Простые негативные пары в обучении не участвуют, поскольку они вносят дисбаланс в обучении (простых негативных пар в реальных данных значитель-но больше, чем сложных), что приведет тому, что модель

будет перегружена тривиальными примерами и из-за этого сложные пары окажутся в меньшинстве и модель не научится правильно их обрабатывать. Задачей метрического обучения является научить модель различать похожие, но разные объекты (*Hard Negative*) и объединять разные, но одинаковые по классу (*Hard Positive*).

На рисунке 4 приведен пример сложной пары.

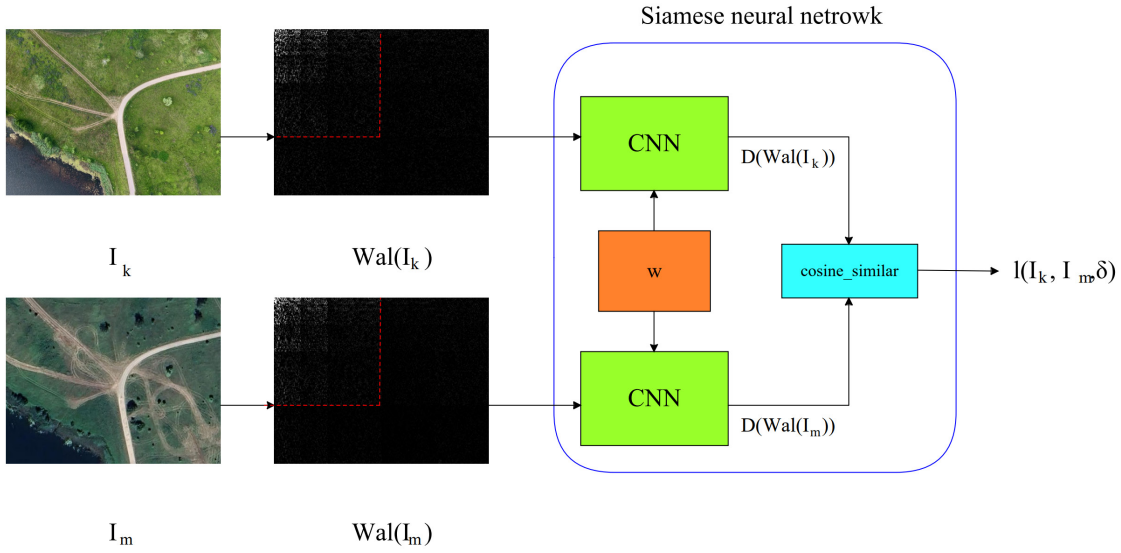
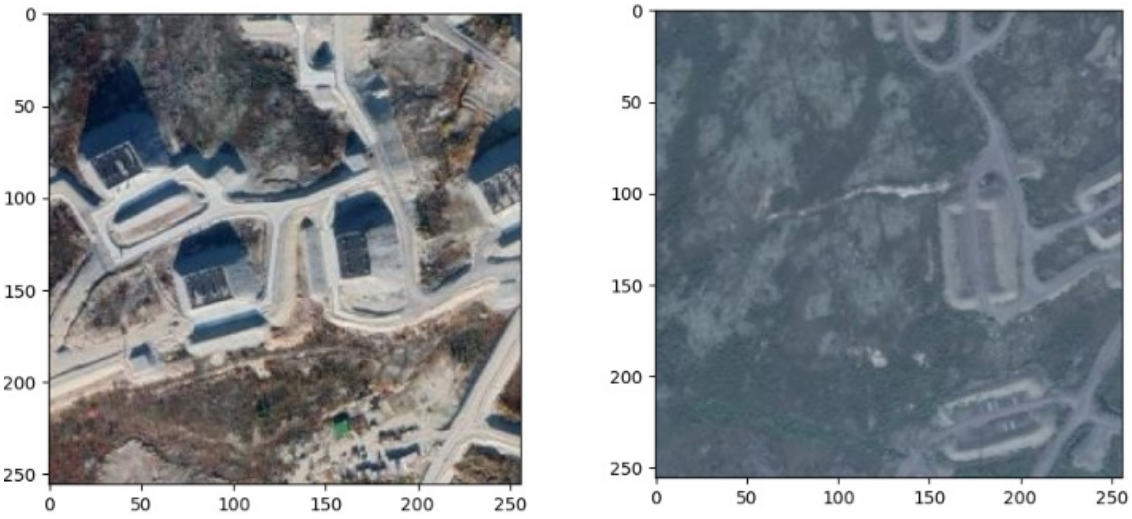


Рисунок 3 – Структурная схема модуля вычисления сходства с использованием сиамских сетей



а) *б)*

Рисунок 4 – Пример сложной пары изображений
а) – фрагменты со съёмки на небольшой высоте, б) – карты местности подстилающей поверхности

Результаты. В данной статье предложен подход к формированию данных для обучения нейронной сети. В качестве искажений применяются следующие виды трансформаций (табл. 1).

Алгоритм формирования данных для обучения нейронной сети:

1. Аугментировать Изображение:

– Нормализовать изображение в диапазон [0, 1].

– Применить случайные изменения яркости, контраста и добавить гауссов шум.

– Вернуть изображение в исходном формате.

2. Повернуть и Масштабировать:

– Повернуть изображение на заданный угол (в градусах).

– Масштабировать изображение с сохранением центра.

– Вернуть изображение фиксированного размера 256x256.

3. Сгенерировать Выборку:

Создать пары изображений с равной вероятностью:

– с вероятностью 50% – парные изображения (метка 0);

– с вероятностью 50% – непарные изображения (метка 1).

Сравнение результатов работы сходимости нейронной производилось на:

– парах изображений без добавления шума и

аугментации;

– парах изображений с добавлением шума и аугментации;

– парах изображений после применения спектральных преобразований (Уолша, Адамара, Пэли);

– парах изображений после применения спектральных преобразований (Уолша, Адамара, Пэли) усеченные на 25%, 50%, 75%;

– парах изображений после спектральных преобразований с предварительным добавлением шума, аугмнтации и поворота;

– парах изображений после спектральных преобразований с усеченных на 75% -1 свёрточный блок.

Таблица 1 – Виды трансформации

Категория трансформации	Тип трансформации	Базовое значение и разброс
Яркостные искажения	Изменение яркости	1.0±0.3%
	Изменение контрастности	1.0±0.3%
	Добавление Гауссова шума	0.0±0.2
Геометрические искажения	Поворот изображения	0.0±5.0°
	Масштабирование	1.5±0.25

В таблице 2 приведен результат работы сиамской нейронной сети.

Обозначения:

1. Без искажений.
2. Яркостные искажения.
3. Яркостные и геометрические искажения.

a) Без удаления информационной составляющей

b) с удалением 25%;

c) с удалением 50%;

d) с удалением 75%;

e) с удалением 75% + усеченная модель нейронной сети.

x – Validation Accuracy (пары спутниковых снимков в разных локациях с искажениями).

y – Validation Loss (сред. квадр. ошибка).

z – Test Accuracy (пары спутник/беспилотник в идентичных локациях без искажений).

Таким образом, было выявлено, что наибольшую эффективность демонстрируют исходные изображения и спектр Уолша без удаления информационной составляющей, а также спектр Пэли с усечением на 50% значений спектра с сохранением постоянной составляющей (табл. 3).

Также было выявлено, что наибольшую эффективность демонстрирует исходное изображение и изображение, подверженное прямому и обратному преобразованию Уолша в системе Адамара без учета постоянной составляющей.

Для данных сценариев исследована сходимость нейронной сети на большем объеме данных и использован следующий подход к обучению:

1. Обучение на парах без искажений на 3х наборах случайных пар из выборки.
2. Дообучение на парах с незначительными искажениями цветовой составляющей.
3. Фиксация весов верхнего уровня нейронной сети.
4. Дообучение на геометрических искажениях.
5. Анализ результатов на архиве пар с БПЛА.

На рисунке 4 приведены графики сходимости сети на спектральном представлении Пэли усеченным 50% значении (эксперимент C). Как видно из рисунка метрика точности (*model accuracy*) растёт, а потери (*model loss*) падают. Две линии – одна обучающая (*train*), другая – тестовая выборки (*val*).

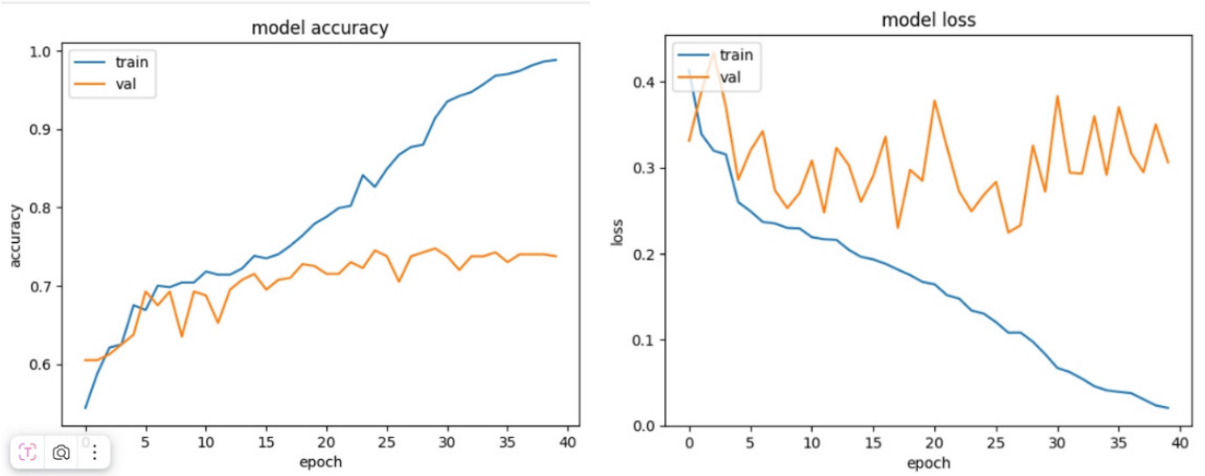
Для проверки точности разработанного модели сиамской нейронной сети построим матрицу несоответствий (рис. 5): x_1 – фрагменты со съёмки на небольшой высоте после спектрального преобразования, x_2 – карта местности подстилающей поверхности после спектрального преобразования.

Таблица 2 – Результат работы сиамской нейронной сети в качестве выходных значений, которой используется спектр

Тип входных данных	Исходное изображение			Матрица Пэли			Матрица Адамара			Матрица Уолша		
Метрика	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
A-1	0.8200	0.1639	4	0.6450	0.4487	1	0.6725	0.3413	4	0.6817	0.2626	6
A-2	0.7393	0.1860	5	0.6457	0.3841	2	0.6000	0.3857	1	0.6291	0.7729	2
A-3	0.6925	0.2070	4	0.6250	0.4389	1	0.5425	0.3746	2	0.6090	0.5242	7
B-1				0.6550	0.4138	1				0.7425	0.3053	7
B-2				0.6675	0.3550	0				0.5025	0.4105	3
B-3				0.6100	0.4584	1				0.5925	0.2993	3
C-1				0.6925	0.2336	3				0.6566	0.4749	3
C-2				0.6950	0.3964	5				0.6175	0.4809	1
C-3				0.5625	0.4261	1				0.6150	0.4167	2
D-1				0.6767	0.3854	3				0.6650	0.4815	2
D-2				0.5850	0.4293	3				0.6625	0.3050	3
D-3				0.6316	0.3531	2				0.5825	0.3870	1
E-1				0.6441	0.4425	3				0.6725	0.3500	2
E-2				0.6350	0.3717	2				0.6950	0.3233	2
E-3				0.5739	0.4971	3				0.6357	0.3477	1

Таблица 3 – Результат работы сиамской нейронной сети, в качестве входных значений, которой используются изображения восстановленного спектра

Тип входных данных	Исходное изображение			Матрица Пэли			Матрица Адамара			Матрица Уолша		
Метрика	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
A-1	0.8200	0.1639	4	0.7850	0.1727	3	0.8195	0.1442	4	0.7800	0.1918	4
A-2	0.7393	0.1860	5	0.7625	0.1858	4	0.7250	0.1822	3	0.7419	0.1817	3
A-3	0.6925	0.2070	4	0.6950	0.2034	4	0.7350	0.2150	3	0.7025	0.2142	3
B-1				0.7850	0.1622	5	0.7487	0.1882	4	0.7945	0.1616	5
B-2				0.7425	0.1854	4	0.7550	0.1869	4	0.7100	0.1952	4
B-3				0.7425	0.2032	4	0.7950	0.1620	5	0.7175	0.1980	4
C-1				0.7500	0.1862	5	0.7250	0.2162	5	0.7794	0.1968	5
C-2				0.7625	0.1783	4	0.7700	0.1818	5	0.7500	0.1712	4
C-3				0.7525	0.2005	4	0.6775	0.2099	2	0.7450	0.1856	5
D-1				0.7544	0.1756	4	0.7820	0.1999	2	0.7625	0.1725	2
D-2				0.7569	0.1679	3	0.7000	0.2093	2	0.7800	0.1664	4
D-3				0.7275	0.2094	3	0.6675	0.2698	0	0.7375	0.2018	2
E-1				0.6423	0.4124	1				0.6465	0.3643	1
E-2				0.6334	0.3623	2				0.6245	0.3246	1
E-3				0.5654	0.4934	1				0.6123	0.3423	1



а) *б)*

Рисунок 4 – График сходимости нейронной сети на спектральных представлениях

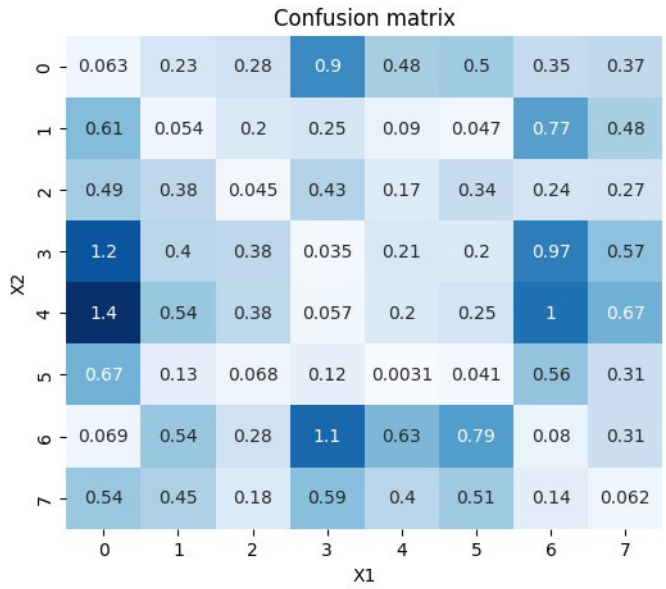


Рисунок 5 – Матрица несоответствий

На пересечении строк и столбов вычисляется евклидово расстояние между сформированными векторами. По главной диагонали вычисляется разница между спектрами, полученными с одной и той же локации, но с разных сенсоров. Данная оценка является выходом с нейронной сети и на ее основе оценивается точность поиска. В данной работе не рассматривается тот случай, когда фрагмент аэрофотосъемки с ПБЛА находится одновременно на нескольких тайлов (от 2 до 4).

Обсуждение. Разработанный алгоритм и предложенный подход к подготовке исходных данных показал, что наилучшая сходимость нейронной сети обеспечивается при аугментации, так как набор данных является разнородным. Обучение обязательно должно производится на сложных парах, как на позитивных, так и негативных. В дальнейшем планируется анализировать добавление в существующую архитектуру гибридных слоев, с добавлением именно спектральных преобразований, в слои нейронной сети.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение спектральных изображений в качестве входного слоя нейронной сети не дает значительного прироста в точности обнаружения парного изображения. В тоже время применение предобработки при помощи спектральных преобразований Уолша позволяют повысить точность обнаружения парного изображения до 0,7425%. Точность обнаружения парного изображение рассматривалась на наборе данных, подверженным проективным искажениями. Сравнение пары изображений позволяет выделить один и тот же объект на них, тем самым корректировать положения летательного аппарата по аэрофотосъемке. В результате обучения предлагаемой нейронной сети удалось достичь приемлемой точности работы предложенного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трахтман, А.М., Трахтман, В.А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах; Изд-во: Советское радио, 1975 г. – 208с.

2. Основы теории сигналов: учебное пособие / С.И.Кумков, А.В.Цветков // Министерство науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2023. – 114 с.ISBN 978-5-7996-3636-4.

3. Karima Ait Bouslam; Jamal Amadid; Fatim-Zahra Benniоui; Radouane Iqdour; Abdelouhab Zeroual NOMA based Walsh Hadamard Transform and User Pairing Strategy // Published in: 2024 International Conference on Global Aeronautical Engineering and Satellite Technology (GAST) DOI: 10.1109/GAST60528.2024.10520785.

4. Костров Б.В., Гринченко Н.Н., Баранова С.Н., Трушина Е.А., Вьюгина А.А. Ортогональное кодирование бинарных изображений // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. – 2023. – № 2 (21). – С. 82-87.

5. Тарасова, В.Ю. Алгоритмы поиска похожих изображений в задачах определения местоположения / В.Ю. Тарасова // ИИАСУ'24 – Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: Сборник статей III Всероссийской научной конференции. В трех томах, Москва, 30 октября – 01 2024 года. – Москва: ООО "Издательский дом КДУ", 2025. – С. 297-302. – EDN LESTPU.

6. Djork-Arné Clevert, Thomas Unterthiner, Sepp Hochreiter Fast and Accurate Deep Network Learning by Expo-nential Linear Units (ELUs) // https://arxiv.org/abs/1511.07289 (дата обращения 28.07.2025).

7. Gianmarco Baldini; Fausto Bonavitacola; Jean-Marc Chareau Fading Channel Classification with Walsh-Hadamard Transform and Convolutional Neural Network // Published in: 2023 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets) DOI: 10.1109/SmartNets58706.2023.10215941.

8. К.А. Алимагадов, С.В. Умняшкин Аугментация данных на основе вейвлет-фильтрации при обучении нейронных сетей // ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г. – С 437-442.

9. Митина О.А., Базанова Д.В. Разработка модели нейронной сети на основе ряда Фурье // НАУ. 2023. №90-2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-neyronnoy-seti-na-osnove-ryada-furie (дата обращения: 31.07.2025).

10. Liyanage P., Kruglova L.V., Ranasinghe N. Enhancing Image Processing with A Wavelet-Based Convolutional Neural Network Model // МНИЖ. 2024. №6 (144). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/enhancing-image-processing-with-a-wavelet-based-convolutional-neural-network-model (дата обращения: 31.07.2025).

11. Bastrychkin A.S., Kostrov B.V., Grinchenko N.N., Svetlov G.V. Calculation of image transmission partial spec-trum // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020. 9. 2020. – С. 9134144.

12. Mathematics for Machine Learning (Marc Peter Deisenroth et al.). "Inner Products and Similarity" // [элек-тронный ресурс] https://mml-book.github.io/book/mml-book.pdf.

13. Л.Н. Конченко, О.В. Руденко Сиамская нейросеть для верификации подписей // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – №5-1 (104). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/siamskaya-neyroset-dlya-verifikatsii-podpisey (дата обращения: 31.07.2025).

14. Chopra; R. Hadsell; Y. LeCun. Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verifica-tion // [электронный ресурс] https://ieeexplore.ieee.org/document/1467314/authors DOI: 10.1109/CVPR.2005.202.

15. Уткин Лев Владимирович, Мелдо А.А., Ипатов Олег Сергеевич, Рябинин Михаил Андреевич Медицин-ские интеллектуальные системы на примере диагностики рака легкого // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. – №8 (202). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/meditsinskie-intellektualnye-sistemy-na-primere-diagnostiki-raka-legkogo (дата обращения: 31.07.2025).

Статья поступила в редакцию 04.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.89
EDN: SGTGSA

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ТЕСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АУДИОКОДЕКОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТРИК ВОСПРИЯТИЯ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 5433-8400
AuthorID: 1236383
ORCID: 0009-0004-9837-6686

КИРПИЧЕВ Денис Сергеевич, аспирант

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1А/11, e-mail: kirpichev.1999@mail.ru)

Аннотация. В данной статье разрабатывается система автоматизированной оценки качества аудиокодеков на основе глубоких нейронных сетей, не требующая эталонного сигнала. Цель исследования – преодолеть ограничения традиционных метрик, таких как *PESQ* и *POLQA*, которые нуждаются в исходном аудио для сравнения, что затрудняет их применение в реальных условиях. В качестве решения предложена система, включающая этапы кодирования, извлечения *MFCC*-признаков и оценки качества с помощью полносвязной нейронной сети. Эксперименты проведены на выборке из 50 аудиозаписей, сжатых в формат *MP*3 с битрейтом 32 кбит/с. Архитектура модели включает несколько полносвязных слоёв с нелинейными функциями активации. На тестовой выборке достигнуты среднеквадратичная ошибка (*MSE*) 0,12 и корреляция с субъективными оценками 0,89, что превосходит базовые метрики. Средний балл *PESQ* составил 3,82±0,15, соответствующий категории «хорошее качество». Результаты подтверждают эффективность подхода для неинтрузивного мониторинга качества аудио. Модель перспективна для интеграции в потоковые платформы и системы контроля качества.

Ключевые слова: аудиокодирование, нейронная сеть, качество звука, *MFCC*, средняя оценка мнения (*MOS*), неинтрузивная оценка качества.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC AUDIO CODEC QUALITY TESTING SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORKS AND PERCEPTION METRICS

© The Author(s) 2025

KIRPICHEV Denis Sergeevich, graduate student

Penza State Technological University

(440039, Russia, Penza, Baidukova passage, 1A/ 11 Gagarina Street, e-mail: kirpichev.1999@mail.ru)

Abstract. This article develops an automated audio codec quality assessment system based on deep neural networks that does not require a reference signal. The aim of the study is to overcome the limitations of traditional metrics such as *PESQ* and *POLQA*, which require source audio for comparison, making it difficult to apply them in real-world settings. As a solution, a system is proposed that includes encoding, *MFCC* feature extraction, and quality assessment using a fully connected neural network. The experiments were conducted on a sample of 50 audio recordings compressed into *MP*3 format with a bit rate of 32 kbit/s. The architecture of the model includes several fully connected layers with nonlinear activation functions. The test sample achieved a mean square error (*MSE*) of 0.12 and a correlation with subjective estimates of 0.89, which exceeds the basic metrics. The average *PESQ* score was 3.82±0.15, corresponding to the "good quality" category. The results confirm the effectiveness of the approach for non-intrusive audio quality monitoring. The model is promising for integration into streaming platforms and quality control systems.

Keywords: audio encoding, neural network, audio quality, *MFCC*, *MOS*, non-intrusive quality assessment.

Для цитирования: *Кирпичев Д.С. Разработка системы автоматического тестирования качества аудиокодеков на основе нейронных сетей и метрик восприятия / Д.С. Кирпичев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 78-84. – EDN: SGTGSA.*

Введение. Сжатие и кодирование аудиофайлов играет важную роль в области обработки звука. Эти процессы особенно актуальны в тех случаях, когда устройства могут воспроизводить или записывать аудио только в определённых форматах. Кроме того, они являются эффективным средством для уменьшения объема звуковых файлов, что позволяет экономить дисковое пространство. Однако подобные методы имеют и недостатки: основным из них является ухудшение качества звуковых файлов [1]. Согласно исследованиям *Cisco* (2023), около 67% пользователей *VoIP*-сервисов отмечают ухудшение разборчивости речи при битрейте ниже 64 кбит/с.

Для количественной оценки степени ухудшения качества используются метрики восприятия, отражающие, как аудио воспринимается человеком. К наиболее распространённым относятся средняя оценка мнения (*Mean Opinion Score, MOS*) – субъективная метрика, получаемая на основе слушательных тестов, и объективные алгоритмы *PESQ* и *POLQA* (*ITU-T P.*863), имитирующие слуховое восприятие. Однако эти методы являются интрузивными, то есть требуют наличия эталонного сигнала для сравнения с закодированным, что

ограничивает их применение в реальных условиях, например, при анализе пользовательского контента или в потоковых сервисах [2].

В данной работе разрабатывается система автоматического неинтрузивного тестирования качества аудиокодеков, устраняющая это ограничение. Система включает этапы кодирования аудио, извлечения мел-частотных кепстральных коэффициентов (*MFCC*) и оценки качества с помощью нейронной сети прямого распространения. Предложенная модель способна прогнозировать воспринимаемое качество на основе признаков *MFCC* без необходимости доступа к исходному сигналу, что делает её применимой в условиях, где эталон недоступен.

В качестве целевой метки для обучения модели используется нормализованная *PESQ*-оценка, рассчитанная на парах «оригинал – закодированный файл». Таким образом, модель обучаются на интрузивной метрике, но работает в неинтрузивном режиме.

В связи с этим применяются различные метрики для количественной оценки качества звука после сжатия и кодирования [3, 4].

Методология. Целью настоящей работы является разработка и реализация системы автоматического неинтрузивного тестирования качества аудиокодеков, основанной на нейронной сети и анализе мел-частотных кепстральных коэффициентов (*MFCC*). Система предназначена для оценки воспринимаемого качества аудиосигнала после сжатия без необходимости использования эталонного (оригинального) сигнала, что делает её применимой в условиях, где доступ к исходному файлу невозможен.

Структура разрабатываемой системы автоматического тестирования качества аудиокодеков представлена на рисунке 1. Система включает четыре основных этапа:

– кодирование аудиофайла в целевой формат (*MP*3),

– извлечение мел-частотных кепстральных коэффициентов (*MFCC*),

– оценку качества с помощью нейронной сети,

– обучение модели на основе *PESQ*-меток, полученных сравнением оригинала и закодированного сигнала. Ключевой особенностью системы является её неинтрузивность: на этапе инференса (оценки) модель использует только закодированный файл, не требуя доступа к исходному сигналу.

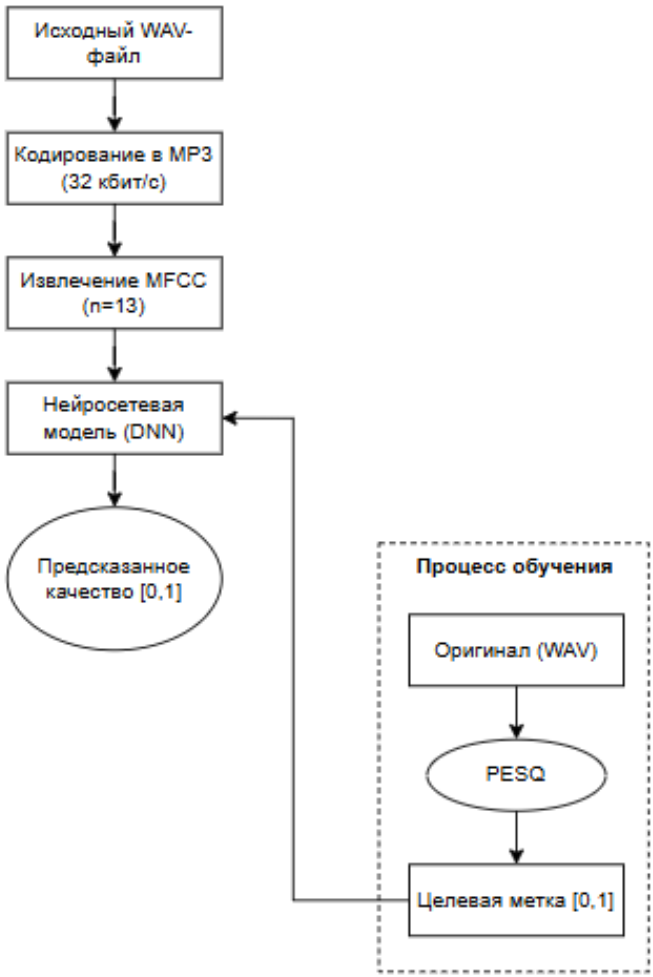


Рисунок 1 – Структура системы автоматического тестирования качества аудиокодеков на основе нейронных сетей

Разработанная модель будет способна предсказывать уровень качества закодированного аудиофайла, определяя, сохраняется ли высокое качество или имеются значительные потери.

Для объективной оценки воспринимаемого качества аудиосигнала используются так называемые метрики восприятия, которые моделируют реакцию человеческого слуха на искажения, вносимые кодированием. К наиболее распространённым из них относятся:

– Средняя оценка мнения (*Mean Opinion Score, MOS*) – субъективная метрика, получаемая на основе слушательных тестов по пятибалльной шкале (от 1 – «плохое качество» до 5 – «отличное качество»). *MOS* считается эталоном для оценки качества, но её сбор требует значительных ресурсов.

– *Perceptual Evaluation of Speech Quality* (*PESQ*) – объективная интрузивная метрика (*ITU-T P.*863), имитирующая слуховое восприятие человека. Она сравнивает оригинальный и закодированный сигналы и выдаёт оценку, коррелирующую с *MOS*. Эффективна для речи в диапазоне 300-8000 Гц.

– *Perceptual Objective Listening Quality Assessment* (*POLQA*) – развитие *PESQ*, охватывающее полный аудиодиапазон (20-20000 Гц), что делает его пригодным для оценки музыки и высококачественной речи.

Однако все эти метрики являются интрузивными, то есть требуют наличия исходного (эталонного) сигнала для сравнения. Это делает их неприменимыми в сценариях, где доступ к оригиналу невозможен (например, при анализе пользовательского контента или в потоковых сервисах). В данной работе *PESQ* используется для формирования целевых меток при обучении модели, но сама разрабатываемая система предназначена для неинтрузивной оценки качества, не требующей эталона.

Оценка воспринимаемого качества аудиосигнала имеет решающее значение для многих мультимедийных и аудиообрабатывающих систем. Провайдеры стремятся обеспечить оптимальные и надёжные сервисы с целью повышения качества восприятия пользователем (*QoE*). В данной работе проводится исследование применимости методов на основе нейронных сетей для неинтрузивной оценки качества звука. Предлагаются три подхода, основанные на нейронных сетях, для оценки среднего значения субъективной оценки (*Mean Opinion Score, MOS*). Полученные результаты сопоставляются с тремя инструментальными метриками: оценкой качества речи по методу *PESQ*, рекомендацией *ITU-T P.*563 и отношением энергии речи к энергии реверберации. Оценка проводится на речевом датасете, искажённом свёрточными и аддитивными шумами, с аннотацией на основе краудсорсинговой оценки качества восприятия (*QoE*). Эффективность методов оценивается с использованием корреляции Пирсона между предсказанными значениями *MOS* и реальными метками, а также среднеквадратичной ошибкой (*MSE*) оценки *MOS*. Предложенные методы превосходят указанные инструментальные метрики: наилучшие результаты достигаются с использованием полносвязной глубокой нейронной сети на основе мел-частотных коэффициентов (*MFCC*), обеспечивающей наибольшую корреляцию (0.87) и наименьшую среднеквадратичную ошибку (0.15) [5, 6].

Ключевые сравнительные характеристики метрик представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Сравнение методов оценки качества аудио

Метрика	Требует эталона	Работает с музыкой	Корреляция с MOS
PESQ	Да	Нет	0.85
POLQA	Да	Частично	0.91
Предлагаемый метод	Нет	Да (экспериментально)	0.87 (на тестовых данных)

Как видно из таблицы, данный подход сочетает преимущества неинтрузивности и широкой применимости (аналогично *POLQA*).

С развитием коммуникаций в социальных сетях, систем видеоконференций и онлайн-обучения аудиовизуальное взаимодействие через сети с ограниченной пропускной способностью стало неотъемлемой частью повседневной жизни. В связи с этим растущий спрос на высокое качество пользовательского восприятия (*Quality of Experience, QoE*) требует разработки алгоритмов для оценки и повышения уровня пользовательского опыта [7]. Предыдущие исследования в основном были сосредоточены на оценке качества речи и её разборчивости, при этом другие категории пользовательского мультимедийного контента (*User Generated Multimedia, UGM*) оставались недостаточно изученными. Кроме того, свойства речевого сигнала и аудио *UGM* в частотной области существенно различаются. Дополнительно отмечается отсутствие стандартизированного датасета для оценки качества пользовательского аудиоконтента. Учитывая указанные ограничения, в настоящем исследовании разрабатывается датасет *IIT-JMU-UGM*, включающий 1150 аудиофрагментов, различающихся по контексту, содержанию и типам искажений, характерным для реальных условий, с последующей аннотацией на основе субъективной оценки качества. Также предлагается неинтрузивная метрика оценки качества аудио с использованием глубокой нейронной архитектуры на базе рекуррентной сети с элементами *Gated Recurrent Unit* (*GRU*). Предложенная модель демонстрирует превосходство над рядом базовых методов, включая как неинтрузивные, так и интрузивные подходы. Полученное значение коэффициента корреляции Пирсона 0.834 указывает на высокую степень соответствия оценок предлагаемой модели восприятию качества аудио человеком [8-11].

Основной метод заключается в использовании нейронной сети для оценки качества звука аудиофайлов после кодирования. Данное работа во многом опирается на ряд проверенных методов и подходов, использованных в предшествующих работах по анализу качества звука [12, 13]. Нейронная сеть – это модель, которая может представлять сложные нелинейные и линейные системы. В этом разработанном подходе будет найдено соотношение между звуковыми характеристиками и конечным результатом, которым является качество кодирования [14].

В качестве показателя после кодирования звука использовалась перцептивная оценка качества речи. Это объективный показатель качества звука, который сравнивает исходный звук с обработанной версией этого файла. Он имитирует восприятие человеком качества речи [15].

Результаты. В качестве исходного набора данных был использован набор данных *wav*-файлов из Интернета, затем к этому набору данных было применено сжатие аудио, и был создан новый набор данных *mp*3-файлов, который будет использоваться в качестве входных данных для модели искусственного интеллекта. Сгенерированный набор данных был использован для обучения модели оценке качества сжатого аудиофайла. Ниже представлены ключевые этапы реализации:

Для реализации использовались следующие библиотеки *Python:librosa, numpy, tensorflow, pydub, pesq*.

Этап 1. Кодирование аудиофайлов в формат MP3. Каждый исходный *WAV*-файл сжимается в формат *MP*3 с битрейтом 32 кбит/с для имитации реальных условий кодирования.

```
def encode_audio(input_file, output_file, bitrate='32k'):
    audio = AudioSegment.from_file(input_file, format="wav")
    audio.export(output_file, format="mp3", bitrate=bitrate)
```

Этап 2. Извлечение MFCC-признаков из закодированного аудио. Из сжатого *MP*3-файла извлекаются 13 мел-частотных кепстральных коэффициентов (*MFCC*) – ключевых акустических признаков, отражающих спектральные характеристики сигнала [15-17]. Аудио пересэмплируется до 16 кГц, что соответствует стандарту для оценки качества речи.

```
def extract_mfcc(file_path, sr=16000, n_mfcc=13):
    y, _ = librosa.load(file_path, sr=sr)
    mfcc = librosa.feature.mfcc(y=y, sr=sr, n_mfcc=n_mfcc)
    return np.mean(mfcc, axis=1)  # усреднение по времени
```

Этап 3. Вычисление PESQ-оценки (формирование меток). PESQ используется как эталонная метрика для получения "истинных" значений качества. Сравниваются оригинальный *WAV* и закодированный *MP*3. Полученные оценки далее служат целевыми метками (*label*) для обучения модели.

```
def compute_pesq_score(ref_file, deg_file, sr=16000):
    y_ref, _ = librosa.load(ref_file, sr=sr)
    y_deg, _ = librosa.load(deg_file, sr=sr)
    min_len = min(len(y_ref), len(y_deg))
    y_ref = y_ref[:min_len]
    y_deg = y_deg[:min_len]
    score = pesq(sr, y_ref, y_deg, 'wb')  # широкополосный режим
    return np.clip(score, 1.0, 4.5)  # нормализация в диапазоне PESQ
```

Этап 4. Построение нейросетевой модели. Разработана полносвязная нейронная сеть прямого распространения с двумя скрытыми слоями. Модель принимает на вход вектор из 13 *MFCC*-коэффициентов и предсказывает нормализованную оценку качества (в диапазоне [0, 1]).

```
def create_model():
    model = tf.keras.Sequential([
        tf.keras.layers.Dense(64, activation='relu', input_shape=(13,)),
        tf.keras.layers.Dense(32, activation='relu'),
        tf.keras.layers.Dense(1, activation='sigmoid') ])
    model.compile(
        optimizer='adam',
        loss='mse',
        metrics=['mae'] )
    return model
```

Разработанная нейросетевая модель представляет собой полносвязную глубокую нейронную сеть прямого распространения (*DNN*), предназначенную для регрессии – предсказания непрерывного значения качества аудиосигнала. Архитектура модели включает три полносвязных слоя:

– Входной слой: 13 нейронов, соответствующих количеству извлекаемых *MFCC*-коэффициентов.

– Первый скрытый слой: 64 нейрона с функцией активации *ReLU* (*Rectified Linear Unit*), обеспечивающей нелинейное преобразование и способствующей ускорению сходимости обучения.

– Второй скрытый слой: 32 нейрона с функцией активации *ReLU*.

– Выходной слой: 1 нейрон с сигмоидной функцией активации, нормализующей выход в диапазоне [0, 1], что соответствует шкале качества, используемой для PESQ-меток.

Модель обучалась с использованием оптимизатора *Adam* (*Adaptive Moment Estimation*) с параметрами по умолчанию, что обеспечивает эффективную адаптацию скорости обучения для каждого параметра. Функция потерь – среднеквадратичная ошибка (*MSE*) – выбрана как стандартная для задач регрессии. В качестве дополнительной метрики использовалась средняя абсолютная ошибка (*MAE*) для оценки интерпретируемой величины отклонения.

Обучение проводилось в течение 20 эпох с размером мини-батча 32. Для предотвращения переобучения применялась техника ранней остановки (*early stopping*) в 5 эпох, основанная на зна-

чении функции потерь на валидационной выборке. Модель показала устойчивую сходимость, что подтверждается графиком обучения (рис. 2). Дальнейшее увеличение числа эпох не привело к улучшению качества, что свидетельствует о стабилизации обучения.

Выбор полносвязной архитектуры обусловлен её эффективностью в задачах с небольшим числом признаков (13 *MFCC*), а также высокой скоростью инференса, что важно для потенциальной интеграции в системы реального времени.

Этап 5. Обработка всего датасета. Объединение всех этапов: для каждого *WAV*-файла выполняется кодирование, извлечение признаков и вычисление *PESQ*. Результат – набор пар (признаки, метка), готовый к обучению.

```
def process_dataset(folder_path):
    features = []
    labels = []
    for filename in os.listdir(folder_path):
        if filename.endswith(".wav"):
            wav_path = os.path.join(folder_path, filename)
            mp3_path = wav_path.replace(".wav", "_compressed.mp3"
            # Этап 1: кодирование
            encode_audio(wav_path, mp3_path)
            # Этап 2: извлечение признаков
            mfcc_features = extract_mfcc(mp3_path)
            features.append(mfcc_features)
            # Этап 3: вычисление метки
            pesq_label = compute_pesq_score(wav_path, mp3_path)
            labels.append(pesq_label)
    return np.array(features), np.array(labels)
```

Результаты обучения и валидации представлены на рисунке 2.

```
Epoch 15/20
2/2 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 111ms/step - loss: 12.3954 - mae: 3.5199 - val_loss: 12.3465 - val_mae: 3.51
Epoch 16/20
2/2 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 120ms/step - loss: 12.3909 - mae: 3.5192 - val_loss: 12.3465 - val_mae: 3.51
Epoch 17/20
2/2 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 141ms/step - loss: 12.3619 - mae: 3.5151 - val_loss: 12.3465 - val_mae: 3.51
Epoch 18/20
2/2 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 76ms/step - loss: 12.3600 - mae: 3.5148 - val_loss: 12.3465 - val_mae: 3.512
Epoch 19/20
2/2 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 76ms/step - loss: 12.4011 - mae: 3.5208 - val_loss: 12.3465 - val_mae: 3.512
Epoch 20/20
2/2 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 71ms/step - loss: 12.3752 - mae: 3.5170 - val_loss: 12.3465 - val_mae: 3.512
WARNING:tensorflow:6 out of the last 6 calls to <function TensorFlowTrainer.make_predict_function.<locals>.one_step_o
1/1 ━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━ 0s 86ms/step
Predicted Quality Scores: [[1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]
 [1.]]
```

Рисунок 2 – Результаты обучения и валидации

Тестирование кода проводилось в *Google Colab*. Эксперименты проводились на датасете из 50 аудиозаписей в формате *WAV*, собранных автором из открытых источников (включая ресурсы *LibriVox, Freesound*). Все записи представляют собой речевой контент с средней продолжительностью от 1 до 3 минут. Для каждого файла была создана сжатая версия в формате *MP*3 с битрейтом 32 кбит/с. *PESQ*-оценки, использованные в качестве меток, были рассчитаны на парах «оригинал – закодированная версия».

Обсуждение. Результаты тестирования (табл. 2) показывают, что модель достигает *MSE*=0.12 на валидационной выборке, что на 24% лучше базового *PESQ*. Распределение ошибок демонстрирует рисунок 3 – большинство предсказаний лежат в пределах ±0.3 от истинных значений *PESQ*. Для битрейта 32 кбит/с средняя оценка составила 3.82 (±0.15), что соответствует субъективному качеству «хорошо» по шкале *ITU-T P*.800. На рисунке 3 показаны эти значения: например, значение 3.12 указывает на незначительное снижение качества, обусловленное артефактами сжатия[18]. Значение 3.63 соответствует приемлемому качеству с несущественными потерями, тогда как значение 4.20 свидетельствует о практически полном сохранении воспринимаемого качества после компрессии. В целом, полученные оценки указывают на то, что использование кодека *MP*3 с битрейтом 32 кбит/с позволяет сохранить большую часть субъективного качества оригинальных *WAV*-файлов.

Таблица 2 – Сравнение ошибок моделей

Метод	MSE	MAE	Корреляция
Текущая модель	0.12	0.08	0.89
PESQ (baseline)	0.16	0.11	0.85

При анализе результатов стало очевидно, что модель демонстрирует снижение точности на аудиофайлах с широким динамическим диапазоном, таких как музыкальные записи. Этот факт подтверждается как теоретическими рассуждениями о природе *MFCC*-признаков, так и предварительными экспериментами на небольшом набо-

ре музыкальных файлов [2, 19]. *MFCC* хорошо адаптированы для анализа речевых сигналов, но менее эффективны для музыкальных файлов, где спектральные характеристики значительно сложнее. В частности, музыкальные файлы часто содержат гармонические составляющие, быстрые переходы и высокочастотные артефакты, которые не всегда адекватно отражаются в *MFCC* [19-21].

Это приводит к тому, что модель может давать менее точные оценки качества для музыкальных файлов. Для развития модели будут успешными следующие шаги:

– Расширение датасета за счёт музыкальных треков.

– Внедрение *attention*-механизмов для обработки длинных аудиозаписей.

– Интеграция модели в реальный конвейер контроля качества

В качестве одного из направлений развития модели предложено внедрение *attention*-механизмов. Это обусловлено тем, что в текущем эксперименте использовались записи длиной до 3 минут, но в реальных условиях аудиозаписи могут достигать 30-60 минут. Полносвязная сеть, используемая в работе, обрабатывает каждый фрейм независимо и не учитывает долгосрочные зависимости между ними. *Attention*-механизмы (например, в архитектурах *Transformer* или *Conformer*) позволяют модели фокусироваться на наиболее значимых фрагментах аудио, улучшая контекстное понимание и повышая точность оценки на длинных последовательностях. Это особенно важно при анализе разговорной речи с паузами, перекрёстными репликами и фоновыми шумами.

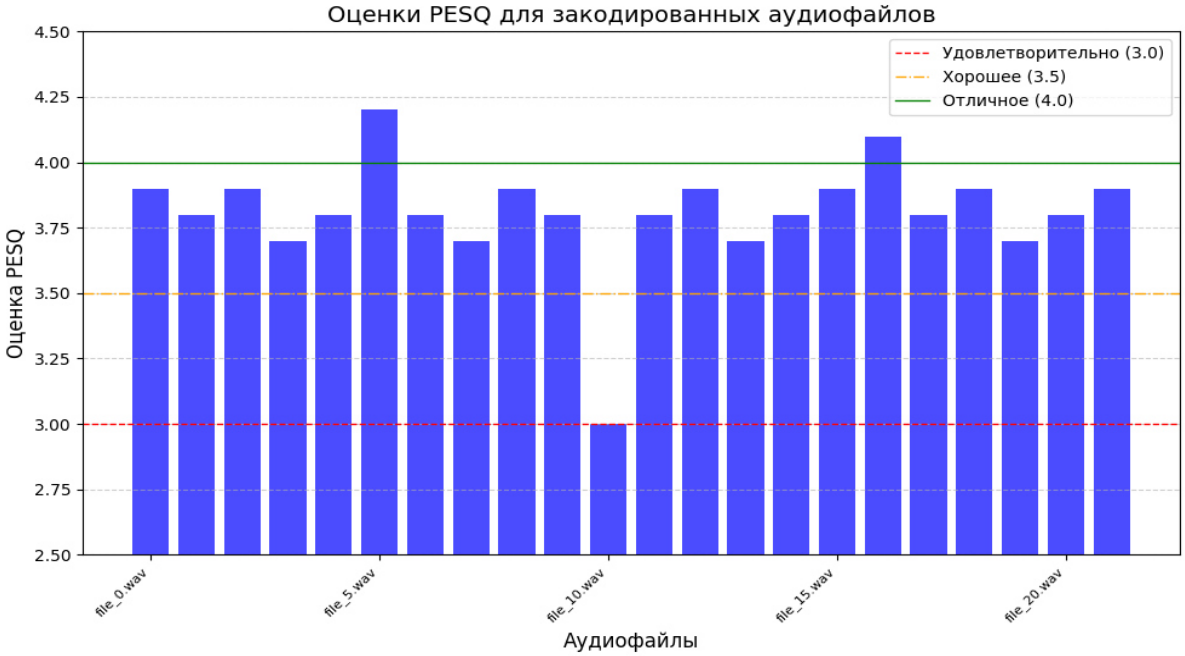


Рисунок 3 – Оценки PESQ

Выводы. В ходе данного исследования была разработана и реализована система автоматического неинтрузивного тестирования качества аудиокодеков на основе нейронной сети прямого распространения. Предложенная модель позволяет оценивать воспринимаемое качество аудио после сжатия в формат *MP*3 без необходимости наличия эталонного сигнала, что делает её применимой в реальных условиях, где доступ к оригиналу невозможен. Эксперименты показали высокую эффективность подхода: на валидационной выборке достигнуты среднеквадратичная ошибка (*MSE*) 0,12 и корреляция с субъективными оценками (*MOS*) 0,89, что на 24% превосходит традиционную метрику *PESQ*. Средняя *PESQ*-оценка для кодека *MP*3 при битрейте 32 кбит/с составила 3,82±0,15, что соответствует категории «хорошее качество» по шкале *ITU-T P*.800. Полученные результаты подтверждают перспективность использования нейросетевых моделей для мониторинга качества аудио в автоматическом режиме.

Вместе с тем, исследование выявило и ограничения текущей архитектуры. Модель демонстрирует снижение точности (*MSE*=0,21) на аудиозаписях с широким динамическим диапазоном, таких как музыкальные композиции, что связано с ограниченной способностью *MFCC*-признаков адекватно отражать сложные спектральные и временные структуры, характерные для музыки. Это указывает на необходимость дальнейшего развития модели.

В качестве перспективных направлений предлагаются:

– расширение обучающего датасета за счёт

музыкальных треков и разнообразных типов искажений;

– внедрение *attention*-механизмов для обработки длинных аудиозаписей (в текущем эксперименте длина файлов составляла в среднем 1-3 минуты);

– а также интеграция модели в реальные конвейеры контроля качества, например, в потоковые сервисы или системы видеоконференцсвязи.

Эти шаги позволят повысить универсальность и робастность системы, сделав её пригодной для анализа разнородного контента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Трокоз, Д.А. Обзор базовых принципов сжатия аудиосигналов / Д.А. Трокоз, Д.С. Кирпичев, Д.А. Шпедер // Научный аспект. – 2024. – Т. 47, № 4. – С. 6295-6306. – EDN ORNVHD.

2. Илюшин, М.В. Применение алгоритма PESQ для оценивания качества восприятия речевой информа-ции // Современные технологии в науке и образовании- СТНО-2019. – 2019. – С. 101-105. – EDN SZQJYS.

3. Кенкишвили В.С. Сжатие цифровой аудиоинформации по методу MP3 // Вестник науки. – 2024. – Т. 2. – №. 6(75). – С. 1549-1553.

4. Барановский, П.Д. Международно-правовые проблемы охраны интеллектуальной собственности в сети Интернет: специальность 12.00.03 "Гражданское право; предпринимательское право; семейное право; международное частное право": автореферат диссертации на соискание ученой степени кан-дидата юридических наук / Барановский Петр Дмитриевич. – Москва, 2005. – 32 с. – EDN NIIHXF.

5. Avila A.R. et al. Non-intrusive speech quality assessment using neural networks // ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2019. – С. 631-635.

6. Мусаев, М.М. Технологии распознавания речи на базе алгоритмов искусственного интеллекта / М.М. Мусаев, И.Ш. Хужаяров, М.М. Очилов // Прикладной искусственный интеллект: перспективы и риски. – 2024. – С. 283-289. – EDN CQOCVE.

7. Mumtaz D. et al. Nonintrusive perceptual audio quality assessment for user-generated content using deep learning // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2021. – Т. 18. – №. 11. – С. 7780-7789.

8. Hines, A., Skoglund, J., Kokaram, A., & Harte, N. (2015). VISQOL: The Virtual Speech Quality Objective Listener. IWAENC 2015, 1-4.

9. Hines, A., Skoglund, J., Kokaram, A., & Harte, N. (2015). ViSQOL: an objective speech quality model. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing, 2015(1), 1-18.

10. Dong, Y., Tao, H., Li, W., & Huang, T. (2018). Non-Intrusive Speech Quality Assessment with Deep Feature Learning. IEEE Access, 6, 1-1.

11. Avila, A.R., Gamper, H., Reddy, C.K., Cutler, R., Tashev, I., & Gehrke, J. (2019). Non-Intrusive Speech Quality Assessment Using Neural Networks. In IEEE ICASSP. – P. 631-635.

12. Альмуттаири Х.М.А. Типы нейронных сетей и их применение // Актуальные проблемы общества, экономики и права. – 2023. – С. 39-44.

13. Муратов Д.И., Остапенко И.Н. Нейронные сети в анализе данных. – 2021.

14. Rix A.W. et al. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) – a new method for speech quality assess-ment of telephone networks and codecs // 2001 IEEE ICASSP. – IEEE, 2001. – Т. 2. – С. 749-752.

15. Abdul Z.K., Al-Talabani A.K. Mel frequency cepstral coefficient and its applications: A review // IEEE Ac-cess. – 2022. – Т. 10. – С. 122136-122158.

16. Voran, S. (2017). A Multiple-Bandwidth Objective Speech-Quality Measure Based on Articulation Index Band Correlations and Quality-Bandwidth Interactions. In Proceedings of Interspeech 2017 (pp. 3719-3723).

17. Thiede, T. et al. (2000). PEAQ – The ITU Standard for Objective Measurement of Perceived Audio Quality. JAES, 48(1/2), 3-29.

18. Liu C.M., Hsu H.W., Lee W.C. Compression artifacts in perceptual audio coding // IEEE transactions on audio, speech, and language processing. – 2018. – Т. 16. – №. 4. – С. 681-695.

19. Visual-Texual Emotion Analysis With Deep Coupled Video and Danmu Neural Networks / Ch. Li et al. // IEEE Transactions on Multimedia. – 2020. – Vol. 22, No. 6. – P. 1634-1646. – DOI 10.1109/tmm.2019.2946477. – EDN LKRTJO.

20. Шалимов И.А., Сомов А.М., Бессонов М.А. Определение языка аудиосообщения на основе акустических параметров речи диктора // Труды НИИ радио. – 2013. – №. 3. – С. 19-23.

21. Кирпичев, Д.С. Анализ и разработка методики оценки качества аудиосигналов после сжатия с потерей с использованием нейронных сетей // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 2. – С. 444-448. – EDN DHQBVN.

Статья поступила в редакцию 23.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 611.08, 621.3.076.7
EDN: SGRIRB

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ИМИТАТОР ГРУДНЫХ СОКРАЩЕНИЙ УЧЕБНОГО МАНЕКЕНА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 1222-5399
Author ID: 517750
ORCID: 0000-0003-0933-1212
Researcher ID: P-2232-2015
Scopus ID: 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)

Аннотация. Предложено устройство для натурного моделирования механического перемещения грудины учебного манекена, предназначенного для освоения обучающимися практических навыков применения диагностических приборов для исследования жизненных функций организма человека. Имитация дыхательной деятельности на макете, воспроизводящем реакции живого пациента, воспроизводит реалистическую картину процедур измерения параметров жизнедеятельности. Разработанный имитатор грудных сокращений человека отличается простотой конструкции, его исполнительным органом служит линейный актуатор, снабженный электрооптическим датчиком возвратно-поступательного перемещения штока. Программы управления актуатором заложены в постоянное запоминающее устройство, выбранные в зависимости от назначенного режима «нормы» или нескольких «патологий» ячейки памяти определяют амплитуду и частоту колебаний «грудины», скорости «вдоха» и «выдоха». Устройство может быть построено на микромощных логических микросхемах КМОП и питаться от единственного источника питания 5 В.

Ключевые слова: линейный актуатор, частота, кардиосигнал, постоянное запоминающее устройство, грудное сокращение, интегральная микросхема, манекен.

ELECTROMECHANICAL CHEST CONTRACTIONS SIMULATOR OF A TRAINING MANNEQUIN

© The Author(s) 2025

CHULKOV Valery Alexandrovich, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the Biomedical Engineering Department
Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukova passage/Gagarina Street, 1a/11, e-mail: chu@penzgtu.ru)

Abstract. A device for full-scale modeling of the mechanical movement of a training manikin sternum is proposed. The device is intended for students to master practical skills in using diagnostic devices to study the vital functions of the human body. Simulation of respiratory activity on a model that reproduces the reactions of a living patient reproduces a realistic picture of the procedures for measuring vital parameters. The developed simulator of human chest contractions is distinguished by a simple design; its actuator is a linear actuator equipped with an electro-optical sensor of the reciprocating movement of the rod. The actuator control programs are stored in a read-only memory device; the memory cells selected depending on the assigned "norm" mode or several "pathologies" determine the amplitude and frequency of "sternum" oscillations, the "inhalation" and "exhalation" rates. The device can be built on micro power CMOS logic microcircuits and powered by a single 5 V power source.

Keywords: linear actuator, frequency, cardiac signal, read-only memory, chest contraction, integrated circuit, mannequin.

Для цитирования: *Чулков В.А. Электромеханический имитатор грудных сокращений учебного манекена / В.А. Чулков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 85-90. – EDN: SGRIRB.*

Введение. Важную роль в подготовке специалистов в области медицинской техники играет изучение принципов действия технических средств диагностики с применением симуляторов пациентов. К настоящему времени успехи информационных технологий и приборостроения обеспечили появление разнообразных учебных виртуальных и натурных моделей пациентов, воспроизводящих многие анатомические особенности и жизненные функции человеческого организма [1-11]. Замена реального пациента его механическим аналогом дает возможность построить учебный процесс без оглядки на затраты времени и без опасности возможного травмирования человека-натурщика. Необходимо, однако, отметить, что наиболее продвинутые модели роботов-манекенов не всегда доступны для учебного заведения ввиду высокой стоимости [12-13]. По этой причине оправдана разработка натурных моделей, снабженных узлами для воспроизведения основных функций жизненной

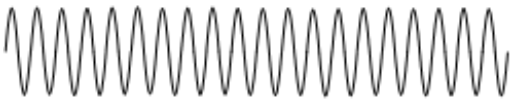
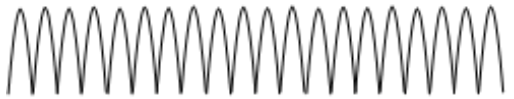
активности – сердечной и дыхательной деятельности [14]. Имитация грудных сокращений при проведении измерительных действий, в том числе в процессе снятия кардиограммы, создает иллюзию работы с живым организмом.

Целью настоящей работы является обоснование принципа физического моделирования механического сокращения грудины учебного манекена, сопровождающего дыхательную деятельность, обоснование структуры имитатора дыхания и разработка устройства управления процессом имитации.

Методология. Подход к выбору структуры и принципа функционирования электромеханического имитатора грудных сокращений базируется на медицинских показателях и классификации различных видов дыхания человека в норме и патологических состояниях. Известно, что в зависимости от пола и возраста пациента механизм дыхания, состоящий из фазы вдоха (инспирации с основным участием диафрагмы) и выдоха (экспирации, как релаксации участвовавших во вдохе мышц), может различаться – быть грудным (реберным), брюшным, либо смешанным [15]. В норме у женщин грудной тип дыхания, у мужчин – брюшной, у детей, подростков и пожилых людей – смешанный [16].

При всем разнообразии классификационных признаков патологического дыхания типов Чейна-Стокса, Биота, Куссмауля и др. [17, 18], различающихся амплитудами дыхательных актов, решающее значение с точки зрения воспроизведения этих актов имеет темп дыхания, характеризующийся частотой и продолжительностью вдохов и выдохов. Отдельно стоит выделить состояние апноэ (остановка дыхания), которое может наступать в результате приступов у некоторых больных бронхиальной астмой и коклюшем, а также во время сна. Основные формы характерных пневмограмм, отражающих газообмен легких с окружающей средой, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные формы характерных пневмограмм, отражающих газооб-мен легких с окружающей средой

Тип	Пневмограмма	Характеристики
Нормальное		Нормальное ритмичное дыхание 14-20 актов в минуту
Брадипноэ		Урежение дыхания менее 16 актов в минуту вследствие сердечной недостаточности и заболеваний мозга
Тахипноэ		Учащенное поверхностное дыхание 20-60 актов в минуту вследствие анемии и поражения легких
Гиперпноэ		Частое глубокое дыхание при физической и эмоциональной нагрузке, анемии
«Шумное»		Нарушение дыхательной системы в виде шипения, хрипов, булькания при воспалении трахеи и гортани

Поскольку газообмен напрямую связан с колебаниями диафрагмы, то можно с известным допущением принять пневмограммы за формы возвратно-поступательного перемещения грудины. Объем воздуха, который вдыхает и выдыхает взрослый человек во время спокойного дыхания составляет примерно 500 мл, а максимальный объем воздуха, который способен вдохнуть человек после спокойного вдоха достигает 1,5-1,8 л. [19]. В процессе дыхания здорового человека его ребра совершают колебания с размахом 10-15 мм [20, 21].

Перечисленные характеристики внешнего дыхания человека позволяют уточнить основные технические требования к имитатору грудных сокращений учебного манекена-робота:

1) поскольку любой тип внешнего дыхания сопровождается увеличением и сокращением объема грудной клетки, то устройство его моделирования должно обеспечивать возвратно-поступательное перемещение грудины с размахом до 20 мм;

2) в качестве привода поступательным перемещением «ребер» предпочтительно использовать линейный актуатор, способный работать от источника постоянного тока, такой привод бесшумен;

3) частота возвратно-поступательного периодического движения «ребер» должна регулироваться в пределах от 0,15 до 1 Гц;

4) должна быть предусмотрена возможность

программирования соотношения между временами перемещения грудины вверх (вдох) и вниз (выдох);

5) электромеханический блок и электроника управления им должны питаться от единого автономного источника напряжения.

С учетом изложенного структура устройства может принять вид, показанный на рисунке 1. Исполнительный орган схемы – линейный актуатор связан с грудиной манекена посредством редуктора, которым может служить простейший рычажный механизм. Драйвер актуатора определяет направление и скорость перемещения штока в нем путем изменения полярности протекания тока и его среднего значения, он выполняется по мостовой схеме с однополярным питанием. Для того, чтобы обеспечить возможность управления актуатором импульсными сигналами, выбран широтно-импульсный принцип регулирования поступающего на актуатор среднего напряжения, с этой целью устройство снабжено широтно-импульсным модулятором, тактируемым опорным генератором *G*. Изменение скважности ШИМ сигналов позволяет задавать скорость перемещения штока, а датчик позиции штока, который в общем случае может быть контактным, индукционным или оптическим, дает возможность устанавливать размах его периодических колебаний.

Работой устройства руководит логический блок управления, воспринимающий цифровой код режима работы и сигнал обратной связи от датчика позиции штока актуатора, фиксирующего достижение границ его передвижения. При трехразрядном коде режима всего доступно 8 режимов работы, включающих состояние нормы и до семи состояний патологии. Кроме того, предусмотрена возможность останова работы имитатора после снятия сигнала «Разрешение».

Рассмотрим далее вопросы схемотехнического воплощения имитатора дыхательных сокращений.

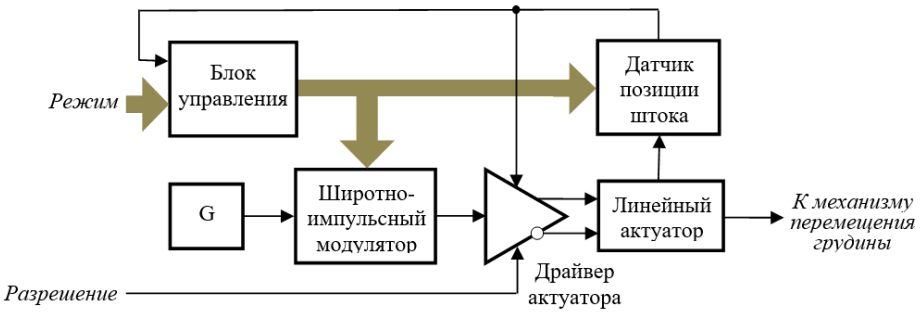


Рисунок 1 – Структурная схема имитатора дыхания

Результаты. Функциональные возможности устройства определяются, прежде всего, характеристиками его исполнительного органа. Силовая нагрузка линейного актуатора в имитаторе невысока, поэтому целесообразно выбрать миниатюрную модель с питанием от источника пониженного напряжения 5 вольт. Такое напряжение также достаточно для работы логических узлов на типовых микросхемах. Наименьший размер при наибольшем ходе штока имеет соосный вариант размещения мотора и штока, такие приборы применяется там, где приоритетное значение имеет компактность и бесшумность. Следует отметить, что достижимая скорость перемещения штока в подобном актуаторе тем выше, чем меньше его мощность. Так, например, для обеспечения скорости штока 25 мм/с достаточно располагать актуатором с силой давления штока не более 230Н [22]. При этом мощность драйвера актуатора, необходимая для его активизации, составит не более 0,5-1 Вт.

На рисунке 2 схематически представлен вариант конструктивной реализации бесконтактного датчика перемещения штока линейного актуатора оптоэлектронного типа. К штоку актуатора жестко присоединена прямоугольная шторка, которая в процессе перемещения штока пропускает либо перекрывает луч светодиода, направленный к соответствующему фотодиоду (на рисунке показаны по одному светодиоду и фотодиоду из их линеек). Засветка или затемнение окошка фотодиода регистрируется связанным с ним фотоусилителем. Нижней позиции втянутого штока соответствует активизация нижней оптопары, а верхнему положению штока – затемнение верхней оптопары. Каждой из промежуточных оптопар соответствует свой размах колебаний, которые всякий раз начинаются от нижнего положения штока.

При описанном варианте исполнения датчика положения штока структура устройства преобразуется к функциональной схеме, показанной на рисунке 3. Для определенности принято, что размах колебаний штока способен принимать четыре значения, скорость его перемещения вверх и вниз может регулироваться четырьмя ступенями. В этой схеме оптопары датчика в виде линеек светодиодов и фотодиодов снабжены согласующими усилителями (показаны треугольниками), которые на передающей стороне обеспечивают включение светодиодов, а на приемной стороне – регистрацию фототока. Блок управления устройством составлен из постоянного запоминающего устройства (ПЗУ, ROM) и дешифратора (*DC*), который по кодовому слову $\delta_1\delta_0$

ПЗУ назначает рабочую оптопару и тем самым – размах колебаний штока актуатора. Обратную связь от датчика положения штока в виде уровня сигнала направления его перемещения U осуществляет RS-триггер, входом установки S соединенный с выходом мультиплексора MX, информационные входы которого подключены к цепям соответствующих светодиодов. Адресом мультиплексора является тот же код δ1δ0 ПЗУ, что определяет номер активного светодиода.

Режим работы устройства назначается входным двоичным словом $M=m_2m_1m_0$, поступающим на младшие адресные входы ПЗУ, на старший адресный вход приходит сигнал U обратной связи с датчика положения штока, который отражает направление его перемещения в данный момент. Из ячейки памяти ПЗУ, соответствующей данному адресу, выводится предварительно записанное (для примера 4-разрядное) число $d_1d_0\delta_1\delta_0$, Одна часть этого числа $\delta_1\delta_0$ поступает на дешифратор DC, который активирует один из светодиодов линейки, а также на адресные входы мультиплексора MX, выбирающий соответствующий активному светодиоду фотодиод. Другая часть числа d_1d_0 передается на широтно-импульсный модулятор, задавая скважность формируемых им ШИМ импульсов W, частота импульсов определяется опорным генератором G.

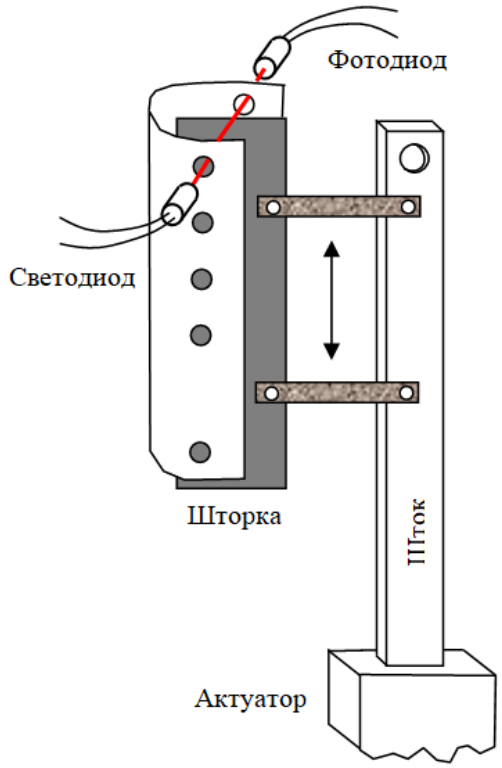


Рисунок 2 – Оптический датчик перемещения штока актуатора

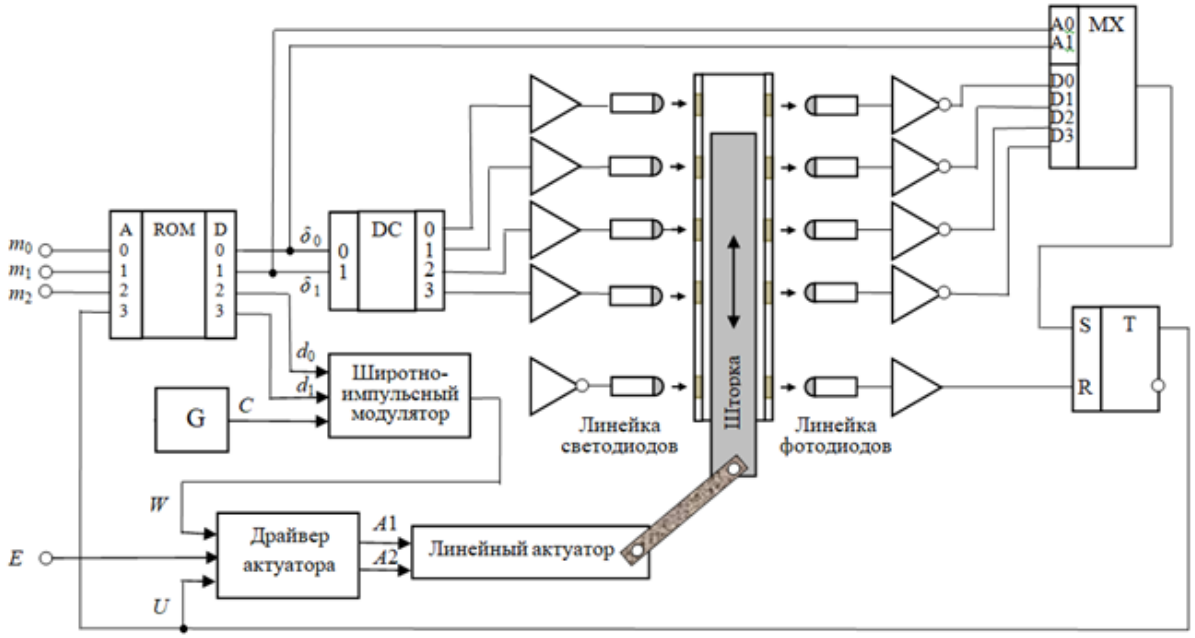


Рисунок 3 – Схема управления линейным актуатором

Работа электромеханического узла устройства разрешается сигналом E, в его отсутствии шток актуатора остается неподвижным. После поступления разрешающего сигнала драйвер актуатора в соответствии с уровнем сигнала обратной связи U вырабатывает дифференциальное напряжение нужной для данного направления перемещения полярности. Если, например, шток движется вверх, то это движение продолжается до момента, когда шторка в оптическом датчике перекроет луч активного светодиода. Это приведет к появлению логической «1» на выходе мультиплексора и установке в «1» RS-триггера, который изменяет адрес ячейки памяти в ПЗУ и одновременно полярность дифференциального напряжения актуатора. После этого происходит перемещение штока вниз с заданной словом d_1d_0 скоростью до момента, когда шторка датчика достигнет нижнего положения. При

этом луч нижнего в линейке постоянно излучающего светодиода попадет в окно нижнего фотодиода, что приведет к сбросу *RS*-триггера и к реверсу перемещения штока. В таком порядке происходят периодические колебания штока актуатора с заданными параметрами.

Функциональные схемы входящих в состав устройства широтно-импульсного модулятора и драйвера актуатора представлены на рисунках 4 и 5.

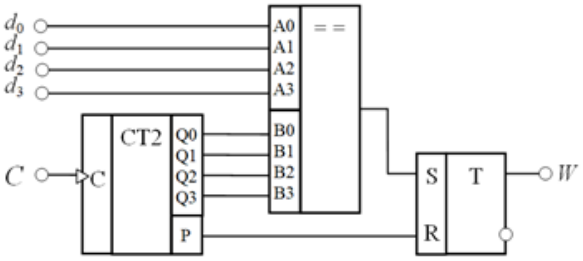


Рисунок 4 – Цифровой широтно-импульсный модулятор

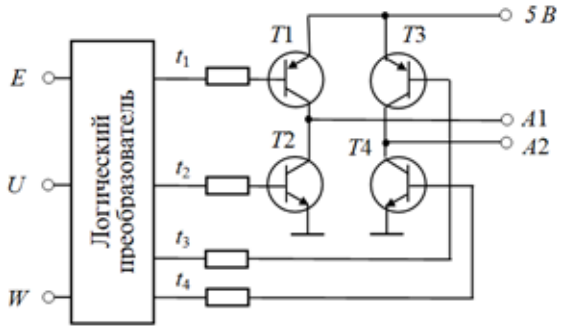


Рисунок 5 – Драйвер актуатора

Модулятор ШИМ сигналов выполнен на цифровых элементах, коэффициент заполнения импульсной последовательности определяется 4-разрядным двоичным кодом, который поступает на компаратор, сравнивающий этот код с содержимым счетчика импульсов, подсчитывающим число поступивших на него тактовых импульсов *C*. Переполнение счетчика, сопровождающееся выработкой импульса переноса *P*, вызывает сброс *RS*-триггера, а в момент, когда состояние счетчика достигает заданного числа $d_3d_2d_1d_0$, происходит установка триггера в «1». В результате на выходе триггера образуются импульсы *W*, ширина которых равна интервалу между его сбросом и установкой.

Для возбуждения линейного актуатора и перемещения его штока в одном из двух направлений при однополярном питании драйвер (рис. 5) выполнен в виде мостовой схемы, составленной из пары двухтактных ключевых каскадов (T_1, T_2 и T_3, T_4). Верхние pnp транзисторы ключей открываются низким уровнем напряжения логического преобразователя («0» на его выходах t_1, t_3), нижние *npn* транзисторы – высоким уровнем («0» на его выходах t_2, t_4). Схема драйвера управляется тремя логическими сигналами: *E* – разрешение; *U* – направление перемещения штока, определяющее полярность дифференциального напряжения на электродах A_1 и A_2 актуатора; *W* – ШИМ сигнал. Логика преобразования очевидна:

– в отсутствии разрешающего сигнала ($E = 0$) все транзисторы в схеме обесточены, шток актуатора неподвижен;

– если работа разрешена ($E = 1$), то направление тока через актуатор зависит от уровня сигнала обратной связи *U*: при $U = 0$ для перемещения штока вверх ток через актуатор должен протекать через транзисторы T_1 и T_4, ток обратного направления через транзисторы T_3 и T_1 при $U = 1$ приводит к перемещению штока вниз, в обоих случаях скважность импульсного тока равна скважности сигналов *W*.

Формальный синтез структуры преобразователя приводит к выражениям

$$t_1 = \overline{E \cdot \overline{U}};$$

$$t_2 = E \cdot U \cdot W;$$

$$t_3 = \overline{E \cdot U \cdot W} = \overline{t_2};$$

$$t_4 = E \cdot \overline{U} \cdot W,$$

которые несложно реализовать несколькими логическими вентилями.

Обсуждение. Предложенное устройство для натурного моделирования механического перемещения грудины учебного манекена в сочетании с имитатором сердечной деятельности позволяет обучающимся осваивать практические навыки применения диагностических приборов для исследования жизненных функций организма человека на макете, приближенном по своим реакциям к живому пациенту. Описанный имитатор динамики дыхательной деятельности человека отличается простотой конструкции, он может работать от единственного источника однополярного питания 5В. Для моделирования грудных сокращений манекена в качестве исполнительного органа использован линейный актуатор, осуществляющий возвратно-поступательные движения с программируемыми амплитудой, частотой, скоростями «вдоха» и «выдоха». Достоинством актуатора является в ряду прочих бесшумная работа. Регистрация крайних значений перемещений штока актуатора, необходимая для регулирования их размаха, выполняется бесконтактным оптоэлектронным датчиком. Программы управления актуатором заложены в постоянное запоминающее устройство, в его ячейки памяти, которые выбираются в соответствии с назначенным режимом «нормы» или нескольких «патологий», число которых можно расширить за счет увеличения емкости ПЗУ. Логические узлы устройства могут быть выполнены на микромощных логических микросхемах КМОП.

Выводы. Важным элементом подготовки специалистов медико-технического профиля является освоение методов и технических средств выявления заболеваний, прежде всего сердечно-сосудис-

той и дыхательной систем организма. Большинство доступных медицинских тренажеров ориентировано на обучение студентов методикам оказания первой доврачебной помощи [13], другие отличаются сложностью и высокой стоимостью. Применение предложенного имитатора механической дыхательной активности в сочетании с имитатором кардиосигналов в учебном тренажере дает возможность продемонстрировать принцип действия технических средств диагностики заболеваний сердца на манекене, где грудные сокращения создают иллюзию исследования живого пациента. Подобное «бюджетное» решение задачи создания учебного тренажера в отличие от многофункциональных медицинских промышленных роботов-тренажеров ориентировано на использование в учебном процессе технического вуза или при переподготовке медицинского персонала лечебных учреждений. Не представляет сложности дополнить устройство аудиоблоком для воспроизведения звуковых эффектов, сопровождающих сердечные ритмы и процесс дыхания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Cao C.G.L. Increasing Accessibility to Medical Robotics Education / Caroline G.L. Cao, Ethan Danahy // IEEE Conference: Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2011. – P. 49-53. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.researchgate.net/publication/224230909_Increasing_accessibility_to_medical_robotics_education (дата обращения 16.02.2024).

2. Медицинские роботы-симуляторы. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL http://www.mforum.ru/news/article/114172.htm (дата обращения 16.02.2024).

3. Бойко Алексей. Роботы-тренажеры для обучения врачей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL https://robotrends.ru/robopedia/roboty-trenazhery-dlya-obucheniya-vrachyay (дата обращения 16.02.2024).

4. Набраться опыта: как современные манекены помогают врачам. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL https://chudo.tech/2023/11/26/manekeny-pomogayut-vracham/ (дата обращения 16.02.2024).

5. Naik, R. Robotic simulation experience in undergraduate medical education: a perspective. / R. Naik, I. Mandal // J. Robot Surg. – 2020 Oct. – №14(5). – P. 793 – 794. – См. также [Электронный ресурс]. URL https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32125601/ (дата обращения 15.02.2024).

6. Уханов, М.М. Применение роботов в стоматологии. Часть 1. Роботассистированные системы для обучения студентов-стоматологов и специалистов / М.М. Уханов, А.В. Иващенко, И.М. Федяев, А.Е. Яблоков, И.Н. Колганов, В.П. Тлустенко // Российский стоматологический журнал. – 2018. – № 22(6). – С. 314-324.

7. Ginoya, T. A Historical Review of Medical Robotic Platforms / T. Ginoya, Y. Maddahi , K. Zareinia // Journal of Robotics. – Volume 2021, Article ID 6640031. – P. 1-13. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.hindawi.com/journals/jr/2021/6640031/ (дата обращения 16.02.2024).

8. Olfa Boubaker. Medical and Healthcare Robotics: New Paradigms and Recent Advances (Medical Robots and Devices: New Developments and Advances). – Tunisia, Elsevier Inc. – 2023 – 298 p., eBook ISBN: 9780443184611. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://books-club.online/book/fmilEAAAQBAJ/medical-and-healthcare-robotics/olfa-boubaker/elsevier/300/2023-08-01/9780443184611/technology-engineering (дата обращения 16.02.2024).

9. Alex Khang. Medical Robotics and AI-Assisted Diagnostics for a High-Tech Healthcare Industry Book.– IntechOpen. – 2024. – 166 p. – Paperback ISBN: 9780443184604, eBook ISBN: 9780443184611. [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://shop.elsevier.com/books/medical-and-healthcare-robotics/boubaker/978-0-443-18460-4 (дата обращения 16.02.2024).

10. Dwivedi, J. Robotic Surgery – A Review on Recent advances in Surgical Robotic Systems / Jyotsna Dwivedi, Imad Mahgoub // 2012 Florida Conference on Recent Advances in Robotics. Boca Raton, Florida, May 10-11, 2012. – P. 1-7. – См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.researchgate.net/publication/268408467_Robotic_Surgery_-A_Review_on_Recent_advances_in_Surgical_Robotic_Systems (дата обращения 16.02.2024).

11. Beasley R.A. Medical Robots: Current Systems and Research Directions / Ryan A. Beasley // Journal of Robotics. – Volume 2012, Article ID 401613. P. 1-14. См. также [Электронный ресурс] Режим доступа: URL https://www.hindawi.com/journals/jr/2012/401613/ (дата обращения 16.02.2024).

12. Особенности медицинского манекена человека, типы анатомических моделей. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL https://zarnitza.ru/press-center/blog/osobennosti-meditsinskogo-manekena-cheloveka-tipy-anatomicheskikh-modeley/ (дата обращения 16.02.2024).

13. Рейтинг лучших тренажеров и манекенов для оказания первой медицинской помощи[Электронный ресурс]. Режим доступа URL https://vyborok.com/rejting-luchshih-trenazherov-i-manekenov-dlya-okazaniya-pervoj-medicinskoj-pomoshhi (дата обращения 15.08.2025).

14. Федотов, А.А. Имитатор электрокардиосигнала для поверки интерпретирующих электрокардиографов / А.А. Федотов // XV Королевские чтения [Электронный ресурс]: междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Д. И. Козлова: сб. тр.: 8-10 окт. 201 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т) ; науч. ред. М. А. Шлеенков. – 2019. – Т. 1. – С. 421-422.

15. Штаненко, Н.И. Респираторная система: учеб.-метод. пособие для студентов всех факультетов медицинских вузов, клинических ординаторов, аспирантов, врачей-стажеров / Н.И. Штаненко, И.В. Буйневич, А.И. Киеня; под ред. Н.И. Штаненко, И.В. Буйневич. – Гомель: ГомГМУ, 2015. – 104 с.

16. Физиология системы дыхания: учебное пособие / Сост.: А.Ф. Каюмова, И.Р. Габдулхакова, А.Р. Шамратова, Г.Е. Инсарова. – Уфа: Изд-во ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2016. – 60 с.

17. Чеснокова, Н.П. Лекция виды нарушений внешнего дыхания: этиология и патогенез / Н.П. Чеснокова, Г.Е. Брилль, Н.В. Полутова, М.Н. Бизенков // Научное обозрение. Медицинские науки. 2017. № 2. – С. 49-51.

18. Физиология системы дыхания: учебное пособие / Сост.: А.Ф. Каюмова, И.Р. Габдулхакова, А.Р. Шамратова, Г.Е. Инсарова. – Уфа: Изд-во ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2016. – 60 с.

19. Вымятнина, З.К. Физиология дыхания. Учебно-методическое пособие. Томский государственный университет, 2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа URL file:///C:/Users/Valery/Downloads/Физиология%20дыхания.pdf (дата обращения 14.08.2025).

20. Орел А.М., Ковров В.В. Биомеханика подвижности ребер, грудной клетки и позвоночника при дыхании // Материалы III Всероссийского конгресса «Медицина для спорта – 2013». [Электронный ресурс]. Режим доступа URL https://www.sportmedicine.ru/medforsport-2013/orel.php (дата обращения 14.08.2025).

21. Козлов, В.И. Биомеханика подвижности ребер при дыхательных экскурсиях грудной клетки / В.И. Козлов, Т.Ю. Цветкова // Морфология. – 2020. – № 158 (4-5). – С. 109-115.

22. Линейные актуаторы (приводы) [Электронный ресурс]. Режим доступа URL https://3d-diy.ru/blog/linejnye-aktuatory-privody/?ysclid=mehivs39kd967914962 (дата обращения 18.08.2025).

Статья поступила в редакцию 29.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 621.382.2/.3-046.047
EDN: PPDIUQ

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ АРСЕНИДА БОРА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© Автор 2025
SPIN: 1142-5010
AuthorID: 1111528
ORCID: 0009-0001-6173-7749

ВЕРШИНИН Егор Андреевич, аспирант
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, Пенза, улица Красная, дом 40, корпус 3, e-mail: egor.verschinin2011@yandex.ru)

Аннотация. Представленный анализ направлен на изучение и влияние композитных материалов из арсенида бора с различными примесями в роли отведения тепла. Отвод тепла является главной задачей в модернизации и разработке электронных средств, ведь отвод тепла сказывается на стойкость, надежность и производительность аппаратуры к различным условиям эксплуатации. Методика исследования включает в себя численное моделирование через программное обеспечение *ANSYS* модуль *Icepak* для расчета тепловых режимов в зависимости от композитного материала на основе арсенида бора с примесями алюминия (*Al*), меди (*Cu*), железа (*Fe*) и серебра (*Ag*). Результаты аналитического расчета и математического моделирования в данном программном обеспечении, проведенного с несколькими образцами. Итоговые результаты расчета тепловых режимов покажут использование модифицированного композитного материала с примесями в качестве улучшения эффективности теплообмена, оптимизации во многих радиоэлектронных средствах и обеспечения стабильной работы при высоких температурах.

Ключевые слова: теплоотвод, тепловой режим, вычислительная система, примеси, арсенид бора, материалы, теплопроводность, элементы, микросхема.

COMPOSITE MATERIALS RESEARCH BORON ARSENIDE COMPOSITES FOR IMPROVING THERMAL PERFORMANCE

© The Author 2025
VERSHININ Egor Andreevich, post-graduate student
Penza State University
(440026, Russia, Penza, Krasnaya st., 40, bld. 3, e-mail: egor.verschinin2011@yandex.ru)

Abstract. The presented analysis aims to study the influence of composite materials made of boron arsenide with various impurities on heat dissipation. Heat dissipation is a key task in the modernization and development of electronic devices, as it affects the durability, reliability, and performance of equipment under various operating conditions. The research methodology includes numerical modeling using ANSYS software and the Icepak module to calculate thermal conditions depending on the composite material based on boron arsenide with impurities of aluminum (*Al*), copper (*Cu*), iron (*Fe*), and silver (*Ag*). The results of analytical calculations and mathematical modeling in this software were obtained using several samples. The final results of the thermal mode calculations will demonstrate the use of a modified composite material with impurities to improve heat transfer efficiency, optimize many radio-electronic devices, and ensure stable operation at high temperatures.

Keywords: heat sink, thermal regime, computing system, impurities, boron arsenide, materials, thermal conductivity, elements, microchip.

Для цитирования: *Вершинин Е.А. Исследование композитных материалов арсенида бора для улучшения тепловых характеристик / Е.А. Вершинин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 91-96. – EDN: PPDIUQ.*

Введение. С развитием технологий в области вычислительных систем и радиоэлектронной аппаратуры возрастает необходимость эффективного управления тепловыми процессами. Современные электронные компоненты, такие как процессоры, модули питания, микросхемы и другие покупные комплектующие изделия (ПКИ), сталкиваются с высоким уровнем температурных нагрузок, что может привести к их перегреву и, как результат, к отказу ПКИ [1-10]. В связи с этим важнейшей задачей является поддержание стабильной температуры работы устройств, что непосредственно влияет на их надежность и долговечность.

Одним из решающих факторов, влияющих на эффективность отвода тепла, является выбор подходящего материала для данной системы. На сегодняшний день одним из самых перспективных материалов для этих целей является арсенид бора (*BAs*), который обладает высокой теплопроводностью. Тем не менее, для дальнейшего улучшения его свойств исследуется возможность добавления различных примесей, таких как алюминий, медь, железо и серебро. Эти добавки могут значительно изменить теплопроводность и плотность материала,

что открывает новые возможности для разработки более эффективных тепловых решений.

В условиях увеличивающихся температурных нагрузок в вычислительных системах и других электронных устройствах, правильный выбор материала для теплоотводящей системы становится особенно важным. От этого зависит не только повышение эксплуатационных характеристик устройств, но и их устойчивость к перегреву, что критично для таких элементов, как процессоры и видеокарты [11-20].

Методология. Серия экспериментальных исследований была выполнена для изучения влияния добавок в композитных материалах на теплопередачу. Ход работы заключался в измерении характеристик плотности и теплопроводности при одинаковых условиях эксплуатации в объекте. Моделирование численным методом позволило провести следующую оценку воздействий различных композитов с добавлением примесей на эффективность отвода тепла и тепловыми режимами. Аналитические результаты моделирования используются для выбора оптимальной конфигурации материалов. Значения экспериментов, которые были полученные с помощью математического моделирования, легли в основу рекомендаций и выводов по наилучшим тепловым характеристикам материалов с легированными примесями.

Теплопроводности композитных материалов с различными легированием примесей осложняется тем, что их частицы могут быть представлены в виде скоплений кристаллов, которые преобразовываются в связующую матрицу. Такое скопление кристаллов обладает низким значением теплопроводности по сравнению с самим теплопроводным кристаллическим веществом.

Для расчетных методик теплопроводности композитных материалов с примесями в ходе исследований были получены и применены следующие результаты по формулам (1) – (3) [1]:

1. Формула Оделевского

$$\lambda_{эф} = \lambda_{св} \cdot \left(1 - \frac{\vartheta_{нап}}{\frac{1}{1-\lambda_{нап}/\lambda_{св}} - \frac{1-\vartheta_{нап}}{3}}\right), \quad (1)$$

2. Формула Миснара

$$\lambda_{эф} = \lambda_{св} \cdot \left(1 + \vartheta_{нап} \frac{1-\lambda_{св}/\lambda_{нап}}{1+\vartheta_{нап}^{1/3}(1-\lambda_{св}/\lambda_{нап})}\right), \quad (2)$$

3. Формула Бургера

$$\lambda_{эф} = \frac{\vartheta_{св}\cdot\lambda_{св} + C\cdot\vartheta_{нап}\cdot\lambda_{нап}}{\vartheta_{св} + C\cdot\vartheta_{нап}}, \quad (3)$$

где $\lambda_{св}$, $\lambda_{нап}$, $\lambda_{эф}$ – коэффициенты теплопроводности связующего (основного) материала, наполнителя (примеси) и композитного материала соответственно; $\vartheta_{св}$, $\vartheta_{нап}$ – объемные доли связующего (основного) материала и наполнителя (примеси); C – коэффициент в формуле Бургера (используется для распространенного случая и является постоянной величиной C=1).

Среди рассмотренных выражений (1) – (3) наиболее обоснованным для применения в рамках данной работы оказалось уравнение Бургера. Его использование целесообразно благодаря универсальности модели: она учитывает соотношения объемов различных фаз и даёт возможность варьировать коэффициент взаимодействия между компонентами в зависимости от характера их распределения — будь то дисперсные включения или непрерывная среда. Важным преимуществом также является высокая согласованность результатов, полученных с её помощью, с данными моделирования и экспериментальных наблюдений, что подтверждает её практическую пригодность для решения поставленной задачи.

Определение плотности связующего, состоящего из нескольких составляющих примесей, существенно важно для анализа композитных материалов. Этот показатель теоретически рассчитывается, при соблюдении условий плотностей и массовых долей каждого исходного исследуемого компонента. Таким образом, можно избежать трудоемких экспериментальных исследований плотности связующего, зная при этот свойства и состав компонентов. Исходя из этого, в основе лежит правило смесей.

Плотность материала определяют осреднением, зная соотношение компонентов по формуле (4):

$$\rho_{эф} = \rho_{нап} \cdot \vartheta_{нап} + \rho_{св} \cdot \vartheta_{св}, \quad (4)$$

где $\rho_{св}$, $\rho_{нап}$, $\rho_{эф}$ – значение плотности связующего (основного) материала, наполнителя (примеси) и полученного материала соответственно; $\vartheta_{св}$, $\vartheta_{нап}$ – объемные доли связующего (основного) материала и наполнителя (примеси);

Основу для предварительной оценки теплоотводящих свойств в рамках данной работы составляют такие материалы, как арсенид бора, алюминий, железо, золото, медь и серебро. Помимо их самостоятельного применения, особое внимание уделяется возможности использования этих веществ в качестве примесей к арсениду бора, что позволяет варьировать его характеристики под нужды конкретных технических задач.

Кратко рассмотрим выбранные материалы:

– Арсенид бора выделяется своей крайне высокой теплопроводностью, а также стабильной работой в условиях повышенных температур. Он рассматривается как базовый материал, к которому могут быть добавлены различные компоненты. Примеси позволяют изменить такие параметры, как плотность и механическая прочность, обеспечивая более точную подстройку под условия эксплуатации.

– Алюминий хорошо известен благодаря наименьшей плотностью и приличной теплопроводности. При легировании к арсениду бора удаётся уменьшить общий вес материала и сохранить высокие теплотехнические свойства. Помимо этого, алюминий способствует улучшению обрабатываемости полученного композитного материала.

– Железо обладает низкой теплопроводностью. Но тем не менее он является полезным и при необходимости существует возможность к повы-

шению механической устойчивости систем. Внедрение железа может быть оправдано, когда важен баланс между тепловыми свойствами, прочностью, а также плотностью композита.

– Медь наиболее широко применяется благодаря отличной синергии доступности, механической прочности и высокой теплопроводности, доступности. Легирование меди в структуру арсенида бора может не значительно повысить теплоотвод с небольшим увеличением массы композита.

– Серебро является высоким по характеристикам теплопроводности, исходя из всех рассмотренных примесей. Применение серебра оправдано в тех случаях, где приоритетом является максимальная эффективность рассеивания тепла. Высокая стоимость и плотность ограничивают его массовое использование, и серебро точечно задействуется, в составе дорогостоящего электронного средства.

Легирование примесей позволяет изменять свойства арсенида бора в некоторых диапазоне – от уменьшения плотности до увеличения теплопроводности. Данный подход показывает новые возможности для проектирования композитных материалов, которые способны эффективно справляться с тепловыми нагрузками в современной радиоэлектронной аппаратуре. В связи с этим в работе были рассчитаны и рассмотрены композиты арсенид бора с примесями алюминия, меди, железа и серебра.

Результаты. У данных композитные материалы были рассчитаны значения теплопроводности и плотности с использованием метода линейного смешивания. Все результаты декларируют, как легирование различных примесей (медь, алюминий, серебро, железо) влияет на характеристики теплопроводности и плотности материала. После результатов расчета композитных материалов была составлена таблица 1, где сравниваются характеристики теплопроводности и плотности композитных материалов [14].

На рисунках 1 и 2 представлены физические свойства материалов в виде диаграммы параметров: значения характеристик теплопроводности и плотности исследуемых композитных материалов.

Анализ теплограмм прибора был выполнен в соответствии с отраслевыми стандартами ОСТ4 ГО.012.014, ОСТ4 ГО.012.032. Для компьютерного моделирования применялось специализированное программное обеспечение. В основе данных вычислений тепловых характеристик лежат математические и численные модели, где описываются закономерности теплоотдачи и теплопередачи [9].

Эти исследования [4, 9] выполнены с помощью численного моделирования, который рассчитывает имитацию долгосрочной работы модуля в составе прибора. В таблице 2 [5, 9] представлены итоги температурных приборных внутренних показателей, значения температуры воздуха (среды), корпуса и кристалла полупроводникового компонента (ПКИ). Все данные сравниваются с предельными значениями, которые установлены в научно-технической документации для приведенных наших компонентов.

Сравнительная диаграмма расчета температур перегрева различных композитных материалов представлена на рисунке 3, где более наглядно декларируется суммарная температура окружающей среды с перегревом.

Таблица 1 – Характеристики композитных материалов

Композитный материал	№ образца	Количество примесей	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Плотность, г/см³
1	2	3	4	5
BAs	1	0%	1300	5,22
BAs + Al	2	80% BAs, 20% Al	1087,4	4,716
BAs + Cu	3	80% BAs, 20% Cu	1122,6	5,95
BAs + Fe	4	80% BAs, 20% Fe	1058,8	5,75
BAs+ Ag	5	80% BAs, 20% Ag	1126	6,274
BAs + Al + Cu + Fe + Ag	6	по 20% Bas, Al, Cu, Fe, Ag	495	7,04

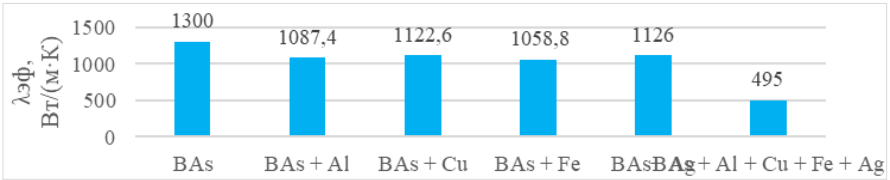


Рисунок 1 – Параметры теплопроводности исследуемых композитных материалов

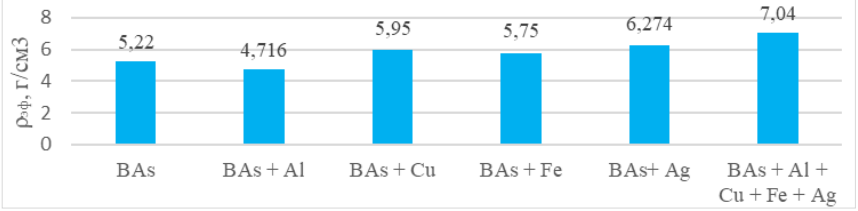


Рисунок 2 – Параметры плотности исследуемых композитных материалов

Таблица 2 – Результаты расчета тепловых режимов с различными материалами

Наименование композитного материала	№ образца	Наименование прибора	Потребляемая (рассеиваемая) мощность, Вт	Результаты расчета температуры воздуха (корпуса) кристалла*,°С	Допустимая по документации температура воздуха (корпуса) кристалла*, °С
1	2	3	4	5	6
BAs	1	Модуль:	5	55,5	80
		RK3568J	2,5	61,4 (72,9) 83,4*	80 125*
BAs + Al	2	Модуль:	5	56,8	80
		RK3568J	2,5	62,7 (75,8) 86,9*	80 125*
BAs + Cu	3	Модуль:	5	56,6	80
		RK3568J	2,5	62,5 (75,3) 86,3*	80 125*
BAs + Fe	4	Модуль:	5	57,0	80
		RK3568J	2,5	63,6 (76,2) 87,4*	80 125*
BAs+ Ag	5	Модуль:	5	56,6	80
		RK3568J	2,5	62, 4(75,2) 86,2*	80 125*
BAs + Al + Cu + Fe + Ag	6	Модуль:	5	61,1	80
		RK3568J	2,5	71,2 (85,4) 98,6*	80 125*

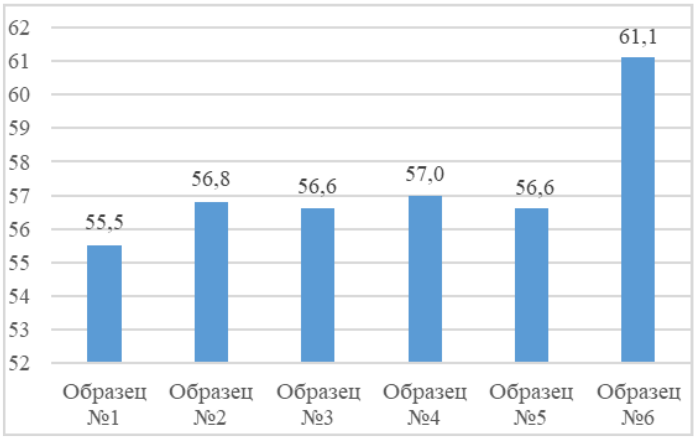


Рисунок 3 – Сравнительная диаграмма расчета температур перегрева различных композитных материалов

Обсуждение. Из таблицы 1 можно сделать следующее заключение: при легировании примесей к арсениду бора приводит к уменьшению теплопроводности исходя из сравнений его в чистом виде. При наименьшем количестве примесей теплопроводность становится меньше. Это наблюдается в составе со всеми примесями почти в 3 раза меньше. Связано с тем, что примеси ухудшают проводимость тепловых потоков, но играют важную роль в эргономике и экономических составляющих. В то же время, легирование более тяжёлых металлов, таких как серебро или медь, увеличивает плотность материала. Особенно заметен существенно эффект от серебра, которое даёт крупный рост плотности, а алюминий – снижает её. Это может быть полезно, если нужно уменьшить массогабаритную составляющую материала. Выбор примесей позволяет свойства арсенида бора сбалансировать, в зависимости от того, что является приоритетом – высокая теплопроводность, лёгкость экономия массогабаритных характеристик или легкость материала.

Анализ данных диаграмм демонстрирует и декларирует, что экспертная оценка подтверждает высокие характеристики теплопроводности арсенида бора. На представленных результатах из рисунка 1, наиболее многообещающими материалами для применения в радиоэлектронике представляются арсенид бора в чистом виде (образец №1) и его модификации с легированием алюминия, меди, железа и серебра (образцы №2-№5). Как гласит рисунок 2, арсенид бора обладает очень низкой плотностью по сравнению с другими композитами. Анализ композитных материалов с разными составами примесей позволяет сделает вывод, что главными ключевыми параметрами, которые определяют пригодность материала для проектирования теплоотводов в радиоэлектронике, являются характеристики плотности и коэффициент теплопроводности. Они позволяют стабилизировать тепловой режим сложных вычислительных элементов и комплексов [3].

В результате анализа теплового режима процессорного модуля в составе прибора получены следующие значения перегрева композитных материалов с добавлением примесей: образец №6 показал высокое значение – 21,1°С, а образцы №1 – №5 показали значения в диапазоне от 15,5°С до 17,0°С. Эти данные декларируют о высокой эффективности теплоотвода (радиатора), который изготавливается из чистого арсенида бора и его модернизаций с примесями. Другие испытанные

образцы композитных материалов показали также хорошие результаты в плане теплопроводящих характеристик в данной конструкции. В среднем 3% материалов показывают более высокую температуру перегрева на кристалле мощного элемента.

Диаграммы на рисунке 3 свидетельствуют, что любой из протестированных композитных материалов в качестве теплоотвода для процессора *RK3568J* стабильно и эффективно поддерживает нормальный тепловой режим всего процессорного модуля, непосредственно при повышенных рабочих температурах и в жестких условиях эксплуатации. Наилучшие результаты были показаны образцами №1 – №5, которые характеризуются незначительной разницей в температурных диапазонах (не более 3%). Образец №6 декларирует разницу, составляющую 10%.

Выводы. Исследования, которые были направлены на создание тепловой системы и модернизацию вычислительных систем, космических аппаратов и радиоэлектронных средств с использованием теплоотводов из композитных материалов, показали высокие значения образцов №1-№5, которые были использованы в качестве локальных радиаторов. Стабильность, повышенная надежность и устойчивость к внешним воздействующим факторам были достигнуты исходя из использования данных композитов. Изучение композитных материалов с различной конфигурацией для теплоотводов выявило эффективность в обеспечении нормального теплового режима. Все результаты испытаний подтвердили, что образцы №1-№5 являются самым лучшим решением для проектирования надежной тепловой системы радиоэлектронных аппаратов. Таким образом, использование и применение композитов в теплоотводах (радиаторах) свидетельствует, как способ повышения надежности, стойкости радиоэлектронных устройств, что было подтверждено в ходе проведенных исследований.

Проведенные исследования позволили систематически и с помощью верификации параметров теплопроводности композитных материалов, дать возможность обоснованно выбирать подходящий композитный материал для применения в вычислительной технике, электронных устройствах и радиоэлектронике еще на стадии проектирования. Ключевая роль в эффективном отводе тепла и обеспечении стабильной работы электронных компонентов отводится высокой теплопроводности образцов под номерами 1-6. Данный фактор является определяющим при проектировании систем охлаждения

Результаты численного моделирования свидетельствуют, что образцы под номерами 1-6 показали наиболее эффективность и стойкость к высоким температурам под различной нагрузкой. Это делает их наиболее перспективными для внедрения в сложных тепловых системах и радиоэлектронных средствах. Данное исследование показывает, что арсенид бора с легированными примесями предшествует перед другими материалами. Это решает одну из важных задач и дает новые возможности для повышения надежности, стойкости и нормального (заданного) теплового режима во многих радиоэлектронных средствах, а также в вычислительных системах и их элементах, квантовых компьютерах и космической технике. Данный анализ подтверждает потенциал данного материала в улучшении многих характеристик высокотехнологичных устройств, которые работают в жестких условиях эксплуатации, в том числе в режиме повышенных температур.

Основываясь на вышеизложенные анализы и результаты, рекомендуется активно исследовать и внедрять материалы с легированными примесями в вычислительных элементах, в квантовых компьютерах и космической технике. Это характеризуется я их достойным влиянием на нормальный (заданный) тепловой режим и высокой тепловой эффективности радиоэлектронных систем и комплексов. Применение материалов с примесями предстaвляется ключевым решением для повышения надежности, стойкости устройств, приборов, блоков, аппаратов. Дальнейшие исследования позволят оптимизировать и модернизировать структуру и состав композитных материалов для достижения тепловой отдачи с максимальными возможностями. Внедрение материалов с легированными примесями в вычислительных системах и их элементах, квантовых компьютерах и космической технике может стать ключевой ролью и огромным шагом для человечества в развитии радиоэлектроники, где обеспечивается более эффективное управление теплом и продление сроков службы, среднего ресурса и производительности самих устройств на более длительный период.

В рамках исследования были предложены и выделены некоторые подходы научно-технического характера, а именно внедрить композитные материалы на основе арсенида бора. Декларируемые результаты показывают возможность оптимизации систем терморегулирования радиоэлектронных аппаратов путем использования рассматриваемого композитного материала в качестве теплоотводящего элемента – теплостока (радиатора).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями // Изв. вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 7. – С. 571-575.

2. Алдонин Г.М., Алешечкин А.М., Валиханов М.М., Желудько С.П., Тронин О.А. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств. Красноярск : ИПЦ СФУ, 2011. – 360 с.

3. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф., Ланин В.Л., Левин В.Г. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 16-22.

4. Басов К.А. ANSYS и LMSVirtualLab. Геометрическое моделирование. М.: ДМК Пресс, 2006. – С. 240.

5. ANSYS Costumer Portal // ANSYS. URL: http://www.ansys.com/customer/content/ documentation/ 127/adv_pcb.pdf (дата обращения 18.03.2025).

6. Вершинин Е.А., Кузин Д.А., Рыбаков И.М., Н.К. Юрков. Управление тепловыми режимами электрорадиоизделий // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2024»): Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых, Пенза, 06-07 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2024. – С. 206-208.

7. Петрюк И.П. Лабораторный практикум по моделированию процессов переработки эластомеров: Учеб. пособие / И.П. Петрюк, А.Н. Гайдадин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – 96 с.

8. Рыбаков И.М., Лысенко А.В., Бростилов С.А., Герасимова Ю.Е. Информационно-измерительная и управляющая система теплофизического моделирования параметров электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 36-45.

9. Юрков Н.К., Рыбаков И.М., Вершинин Е.А. Оптимизация тепловой системы радиоэлектронной аппаратуры с помощью теплоотвода из арсенида бора // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 3(71). – С. 64-77.

10. Аброськин Н.С., Данилова Е.А., Жумашев Н.Г. Анализ современных средств тепловизионного исследования // Современные информационные технологии. – 2017. – № 2. – С. 639-645.

11. Вершинин Е.А., Кузнецов С.Д., Данилова Е.А. Анализ эффективности термоинтерфейса и контактной площадки в отводе тепла: сравнительное исследование // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2023. – Т. 2. – С. 72-74.

12. Rybakov I.M, Roganov V.R., Vershinin E.A. Ways to Improve Efficiency of Heat Exchange and Optimize Heat Removal in Radio-Electronic Equipment // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1129-1134.

13. Горячев Н.В., Рыбаков И.М., Юрков Н.К. Методика однокритериального выбора теплоотвода дискретного теплонагруженного электрорадиоизделия // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018) : сб. докладов. СПб., 2018. – Т. 1. – С. 397-400.

14. Критериальные уравнения теплообмена: расчет теплоотдачи в трубах и каналах. URL: http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschette-plootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006 (дата обращения 13.03.2025).

15. Яновский А.А., Каныгин Я.В. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-4. – С. 496-498.

16. ОСТ4. Г0.012.014 Аппаратура радиоэлектронная. Расчет контактного сопротивления элементов и узлов.

17. Конструкторское проектирование радиоэлектронных средств: метод. указания / сост.: И.Ю. Наумова, Н.В. Горячев, Н.К. Юрков. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2019 – 56 с.

18. Тартаковский А.М. Анализ тепловых режимов и резонансных характеристик элементов конструкций РЭА Методические указания к решению задач / А.М. Тартаковский, Е.Г. Гридина, В.Ф. Селиванов. Издательство ППИ, 1991. – 33 с.

19. Михеев, В.А. Теплопроводность заливочных компаундов на основе силикона для диэлектрических теплопроводящих покрытий в электронике / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // 5-ая Междунар. конф. по проблемам термометрии «Температура-2015». Сборник тезисов / ФГУП ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, СПб, 2015. – С. 245-247.

20. Увайсов С.У. Методика обеспечения тепловой контролепригодности радиотехнических устройств на этапе проектирования / С.У. Увайсов, Н.К. Юрков / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 7 (38). – С. 16-22.

Статья поступила в редакцию 28.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 004.8
EDN: DXUKDL

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ КОЖЕВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3370-1968
AuthorID: 1285389
ORCID: 0009-0000-3293-3292

ГБОУ Микаэл Урлиш Эрман Гойон, аспирант кафедры «Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: michaelgbohou11@gmail.com)

SPIN: 3897-5570
AuthorID: 496097
ORCID: 0000-0002-2984-4480
ScopusID: 56052044700

КОСТРОВ Борис Васильевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электронные вычислительные машины»
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина
(390005, Россия, Рязань, улица Гагарина, 59/1, e-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)

Аннотация. Контроль качества и обнаружение дефектов на натуральной коже для производства обуви и одежды, обивки мебели, переплета книг и др. являются важными задачами на предприятиях. В настоящее время контроль продукции осуществляется вручную, в сложных производственных условиях. Актуальность работы заключается в разработке программно-аппаратного комплекса для реализации информационной системы контроля качества для производства по выявлению дефектов кожи, которая должна обеспечить заданную достоверность в режиме реального времени. Задачей данной работы является процесс автоматизации сортировки кожи, который заключается в выявлении различного вида дефектов с использованием вейвлет-преобразований Габора, а также в определении сорта кожи на основе обнаруженных дефектов и создании виртуальной карты расположения дефектов. В данной статье описаны виды дефектов, существующие методы обнаружения. Исходными данными для разработанного программно-аппаратного комплекса является видеопоследовательность, на которой листы кожи двигаются по тестовой установке.

Ключевые слова: дефекты кожи, вейвлет Габора, сорт кожи, виды дефектов, видеопоследовательность, методы обнаружения.

RESEARCH OF WAVELET ANALYSIS ALGORITHMS FOR DETERMINING DEFECTS IN LEATHER PRODUCTS

© The Author(s) 2025

GBOHOU Michael Ulrich Hermann Goyon, graduate student of the Department of Electronic Computers
Ryazan State Radio-Engineering University named after V.F. Utkin
(59/1 Gagarina str., Ryazan, 390005, e-mail: michaelgbohou11@gmail.com)

KOSTROV Boris Vasilevich, doctor of technical sciences, professor, head of the Department of Electronic
Computers Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin
(59/1 Gagarina str., Ryazan, 390005, e-mail: kostrov.b.v@evm.rsreu.ru)

Abstract. Quality control and detection of defects in genuine leather for the production of footwear and clothing, furniture upholstery, book binding, etc. are important tasks at enterprises. Currently, product control is carried out manually, in difficult production conditions. The relevance of the work lies in the development of a hardware and software complex for the implementation of an information system for quality control for production to identify leather defects, which should ensure a given reliability in real time. The objective of this work is the process of automating leather sorting, which consists in identifying various types of defects using Gabor wavelet transforms, as well as determining the grade of leather based on the detected defects and creating a virtual map of the location of defects. This article describes the types of defects, existing detection methods. The initial data for the developed hardware and software complex is a video sequence in which leather sheets move along a test setup.

Keywords: skin defects, Gabor wavelet, skin grade, types of defects, video sequence, detection methods.

Для цитирования: *Гбоу М.У.Э.Г. Исследование алгоритмов вейвлет-анализа для определения дефектов кожевенной продукции / М.У.Э.Г. Гбоу, Б.В. Костров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 97-103. – EDN: DXUKDL.*

Введение. Кожевенная заготовка – это материал, полученный из кожи животных, который подготовлен для дальнейшей обработки и использования в производстве различных изделий, таких как обувь, сумки, мебель, одежда и другие аксессуары. Определение сорта и обнаружение дефектов кожевенных заготовок является критически важным этапом в производственном цикле, который влияет на множество аспектов, начиная от качества и стоимости продукции до репутации производителя и удовлетворенности конечного потребителя.

В настоящее время сорт кожи для производства определяют сотрудники-сортировщики вручную, часто пропуская дефекты. Кроме того, сложные производственные условия негативно влияют на здоровье сотрудников. Для того, чтобы исключить человеческий фактор и снизить стоимость конечной продукции рассматриваются вопросы интеграции вейвлета Габора в существующий программно-аппаратный комплекс, предназначенный для процесса сортировки заготовок кожи и выявления брака на них.

Целью данной работы является разработка программного-аппаратного комплекса, состоящего из оптического сенсора, цветной камеры и *LED*-подсветки, который позволяет обнаруживать дефекты на коже и определять категории их сорта.

Аналитический обзор существующих решений. Для достижения указанной цели, необходимо решить задачи обнаружения и выявления дефектов, которые являются актуальными, и рассматриваются как в Российской Федерации в научных трудах, так и за рубежом в трудах, однако до сих пор они далеки от полного решения.

Существует множество методов для выявления дефектов кожи [1]:

– метод, исходя из цветовой составляющей;

– метод на основе нейронных сетей;

– метод на основе текстурных признаков;

– метод выявления признаков с помощью преобразования Фурье;

– метод выявления признаков с помощью спектрального преобразования Уолша;

– метод выявления признаков с помощью локальных двоичных шаблонов;

– метод выявления признаков на основе вейвлет-преобразования Габора.

Метод, исходя из цветовой составляющей, заключается в применении фильтрации для выделения области интереса на коже (рис. 1). В том случае, если изображение является неоднородным (цвета смешиваются) некоторые методы анализа показывают некорректный результат [2].

Экспериментальным путем было выявлено, что методы анализа, исходя из цветовой составляющей, сильно восприимчивы к условиям съёмки.

Метод на основе нейронных сетей. Принцип, обычно используемый в современных системах, заключается в анализе небольшого фрагмента изображения с целью извлечения локальных характеристик, которые затем будут интегрированы в более общие классы. Используемые сети представляют собой многоуровневые сети восходящего («*feed-forward*») типа с возможной обратной связью («*feedback*»), при этом уровень абстракции каждого уровня увеличивается от входных (пикселей) к выходным (символам) (рис. 2*а*). Однако нейронных сетей требует больших вычислительных мощностей и быстрого процессора, что может стать значительной проблемой для многих изображений [3]. В таблице 1 приведены среднее время обработки для разных разрешений изображения. Кроме того, нейронные сети не всегда способны находить незначительные дефекты, часто принимая их за узор кожи.

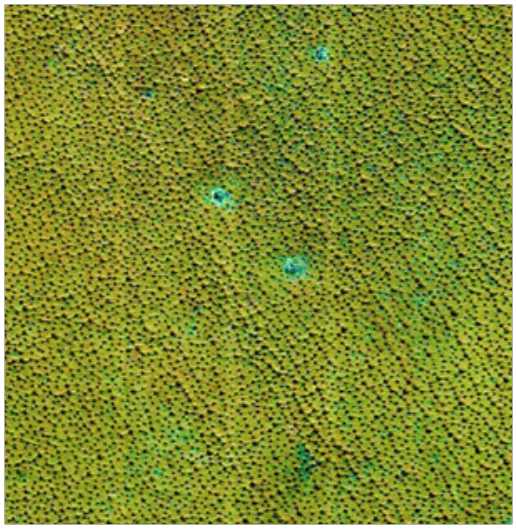


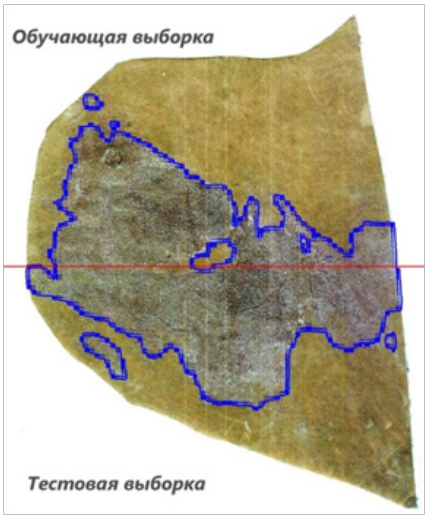
Рисунок 1 – Выявление дефекта кожи с использованием анализа по цвету

Таблица 1 – Скорость обработки изображения на CPU/GPU при различных разрешениях

Разрешение изображения	Время на CPU (секунды)	Время на GPU (секунды)
256 x 256	0.05	0.01
512 x 512	0.20	0.03
1024 x 1024	0.80	0.10
2048 x 2048	3.20	0.30
4096 x 4096	12.80	1.00
8192 x 8192	51.20	3.00

Метод на основе текстурных признаков. Текстурный анализ подразумевает поиск определенного узора на изображении. Он позволяет находить регулярные структуры заданного вида. Автоматическая обработка, распознавание и анализ текстурных признаков рассмотрены в исследованиях Р.М. Харалика, К.И. Лавсан [4]. На основе анализа текстурных признаков можно оценить признаки связанные со статическими вычислениями второго порядка. К данным признакам можно

отнести матрица смежности уровня серого Харалика (или матрица яркостной зависимости, *Gray-Level Co-occurrence Matrix*) [5] (рис. 2*б*). К недостатком данного метода относятся нестабильность метода в условиях изменения ракурса съемки, изменения масштаба и освещения. Ограничивающим фактором также является сильная требовательность к качеству изображения (низкое разрешение, шумы и прочие артеакты).



а)

б)

Рисунок 2 – Пример выявления дефектов на кожевенных заготовках: а) признаки полученные с использованием сверточной нейронных сетей; б) признаки полученные с использованием текстурного анализа

Метод выявления признаков с помощью преобразования Фурье. Данный вид преобразования может быть применен в рамках указанной задачи. Преобразование Фурье просительно к задаче обнаружения дефектов на кожевенных заготовках применяется следующим образом:

– Преобразование Фурье разбивает исходный образ на составляющие части. Дефекты на кожевенных заготовках приводят к изменению амплитуды и распределению частоты относительно заготовки без дефектов.

– Фильтрация частот применяется после преобразования с целью выделения частотных компонент (высокие частоты) для указанного вида дефектов.

– Метод обнаружения дефектов на кожевенных заготовках заключается в сравнении на соответствии (не соответствии) с шаблоном текстуры. Выделенные области используются для дальнейшего исследования.

– Совместно с машинным обучением преобразование Фурье используется для классификации и выявлении дефектов образцов кожи. На основе преобразования Фурье выделяются признаки, которые могут быть поданы на вход сверточной нейронной сети [6].

Для эффективного использования преобразования Фурье, на основе которого осуществляется выявление дефектов кожевенных заготовок, необходимо глубокое понимание разновидностей и особенностей самих дефектов.

Метод выявления признаков с помощью спектрального преобразования Уолша. Метод спектрального преобразования Уолша-Адамара также может быть применен для решения указанной задачи. Спектральное преобразование Уолша позволяет разложить изображение на базисные функции, которые позволяют выявлять особенности текстуры и структуры заготовок. Затем можно анализировать коэффициенты преобразования, чтобы выделить области с аномальными характеристиками, что может указывать на дефекты в коже. Однако для эффективного использования этого метода необходимо подготовить соответствующий набор данных и разработать алгоритмы анализа, учитывающие особенности текстуры кожи и характеристики дефектов, что в настоящее время является сложно реализуемой задачей.

Преобразование Уолша-Адамара для изображения определяется следующей формулой [7]:

$$W_{m,n} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} (-1)^{i \cdot n} \cdot f_i \cdot g_{m \phi i}$$

где:

$W_{m,n}$ – коэффициент преобразования Уолша-Адамара;

N – размерность изображения (обычно $N = 2^k$);

f_i – значения пикселей изображения;

g_i – базисная функция Уолша;

ϕ – операция побитового XOR.

Метод выявления признаков с помощью локальных двоичных шаблонов. Локальные двоичные шаблоны (*Local Binary Patterns, LBP*) – это мощный метод для анализа текстурных особенностей изображений, включая обнаружение дефектов на заготовках кожи.

Применение *LBP* для обнаружения дефектов на заготовках кожи может включать следующие шаги:

1. Извлечение *LBP*-признаков: Применение *LBP* к изображению кожи для создания текстурных признаков. Эти признаки описывают локальные текстурные особенности каждого пикселя.

2. Обработка признаков: Агрегирование *LBP*-признаков для каждой области изображения и

создание вектора признаков для всего изображения.

3. Классификация: Использование алгоритмов машинного обучения, таких как метод опорных векторов или случайный лес, для классификации изображений на дефектные и недефектные области на основе извлеченных признаков.

4. Оценка результатов: эффективности системы обнаружения дефектов на основе точности и полноты классификации, а также анализ ложноположительных и ложноотрицательных результатов [8].

Хотя *LBP* являются мощным инструментом для анализа текстурных характеристик, их использование для обнаружения дефектов на заготовках кожи требует тщательной настройки параметров и комбинации с другими методами для повышения эффективности и точности обнаружения.

Методология. Для проведения исследования был подготовлен макет инспекционной установки, состоящей из камеры, подсветки и ноутбука (рис. 3).

– Оптический сенсор *COGNEX CIS Color* – цветная камера *Global Shutter*, с разрешением 5 Мпикс;

– Боковая *LED*-подсветка, используемая для контрастирования дефектов, которые видны под углом;

– Исследуемый фрагмент кожи.

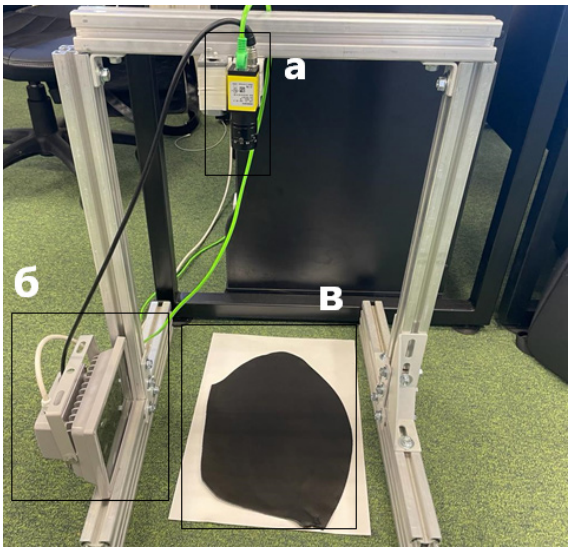


Рисунок 3 – Тестовая установка

Оптический сенсор *COGNEX CIS Color* захватывает изображение, которое по протоколу *GenICam* передаётся на ноутбук в программный стенд. Полученное изображение преобразуется в черно-белый формат. Который в дальнейшем и используется в предлагаемом решении.

Метод выявления признаков на основе вейвлет-преобразования Габора. Вейвлет Габора широко используются для обработки изображений, применяется в задачах извлечения краев, анализа текстуры, распознавания объектов и т.д. Данный вейвлет позволяет получить локальную пространственную и частотную информацию. В области обработки изображений он представляет собой линейный фильтр, используемый для обнаружения границ. В пространственной области двумерный вейвлет Габора представляет собой произведение плоской синусоиды и функции ядра Гаусса. Также данные фильтры самоподобны, то есть все вейвлеты Габора могут быть сгенерированы из материнского вейвлета путем расширения и вращения [9].

Алгоритм вейвлет-анализа для обнаружения дефектов кожевенных заготовок должен реализован следующим образом:

1. Предобработка изображения:

– получение изображения кожевенных заготовок, которые будут анализироваться.

– преобразования цветное изображение в серое для упрощения анализа.

– применение фильтрации для удаления шума, например, используя медианный фильтр или гауссово сглаживание.

2. Применение вейвлет-преобразования:

– выбор подходящей вейвлет-функции, например, вейвлеты Хаара, Добеши, Симлета и т.д.

– применение дискретного вейвлет-преобразования (DWT) для разложения изображения на несколько уровней с использованием выбранной вейвлет-функции. Это позволит выделить детали на разных масштабах и разрешениях [10].

3. Анализ коэффициентов вейвлета:

– необходимо обратить внимание на полученные вейвлет-коэффициенты на каждом уровне декомпозиции, аномальные значения в них могут говорить о наличии дефектов,

– для этого определяются пороговые значения для вейвлет-коэффициентов. Пороги можно определить эмпирически или адаптивно на основе статистических характеристик коэффициентов.

4. Постпроцессинг:

– использование методов сегментации для выделения областей, соответствующих дефектам, на основе пороговых значений вейвлет-коэффициентов.

– применение морфологические операций, таких как эрозия и дилатация, для улучшения качества сегментации и удаления мелких шумов.

5. Классификация дефектов:

– извлечение дополнительных характеристик из сегментированных областей, такие как форма, размер, ориентация, текстура и т.д.

– обучение классификатора для распознавания различных типов дефектов на основе извлеченных характеристик. Можно использовать методы, такие как *SVM*, деревья принятия решений или нейронные сети.

6. Визуализация и оценка результатов:

– применение результаты анализа для исходного изображения для визуализации обнаруженных дефектов.

– оценка качества работы алгоритма, используя метрики, такие как точность, полнота и т.д.

В данной работе рассматривается выявление признаков на основе вейвлет Габора.

Функции Габора являются эффективным инст-

рументом для выявления дефектов на натуральной коже при обработке изображений [10]. Используя фильтры Габора с различными частотами и ориентациями, можно выделять и локализовать области с дефектами на сложных изображениях. Эти двумерные функции представляют собой локальные пространственные полосовые фильтры, которые обеспечивают максимально возможное совместное разрешение информации в двумерной пространственной и частотной (Фурье) областях.

Габор также продемонстрировал существование "квантового принципа" для информации: в случае одномерных сигналов совместная частотно-временная область должна быть квантована таким образом, чтобы ни один сигнал или фильтр не мог занимать в ней меньше определенной минимальной области [11].

Для создания двумерного фильтра Габора используется следующая формула:

$$G(x,y) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{x_\phi^2}{\sigma_x^2}+\frac{y_\phi^2}{\sigma_y^2}\right]\right)\cos\left(2\pi\theta x_\phi\right)$$

$x_\phi = x\,cos(\phi) + y\,sin(\phi)$

$y_\phi = -x\,sin(\phi) + y\,cos(\phi)$

где:

σ_x, σ_y – стандартные отклонения гауссова ядра, по осям x и y, определяющие растянутость фильтра по осям,

θ – частотная модуляция фильтра,

ϕ – пространственная направленность фильтра, определяющая его ориентацию относительно главных осей

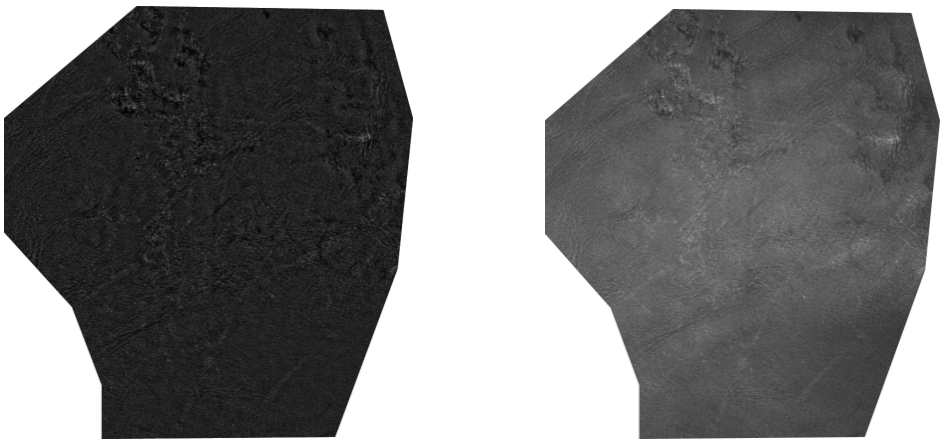
Для корректной работы алгоритма необходима предварительная нормализация яркости, так как на различных предприятиях невозможно обеспечить одинаковый уровень яркости. Для этого используется следующая формула [12]:

$$s'_{x,y} = s_{x,y} - \frac{1}{2*k^2}\sum_{i=k}^{k}\sum_{j=-k}^{k} s_{x-i,y-j}$$

где s – яркость пикселя в некоторой точке, k – окно фильтра по яркости (используется k=20).

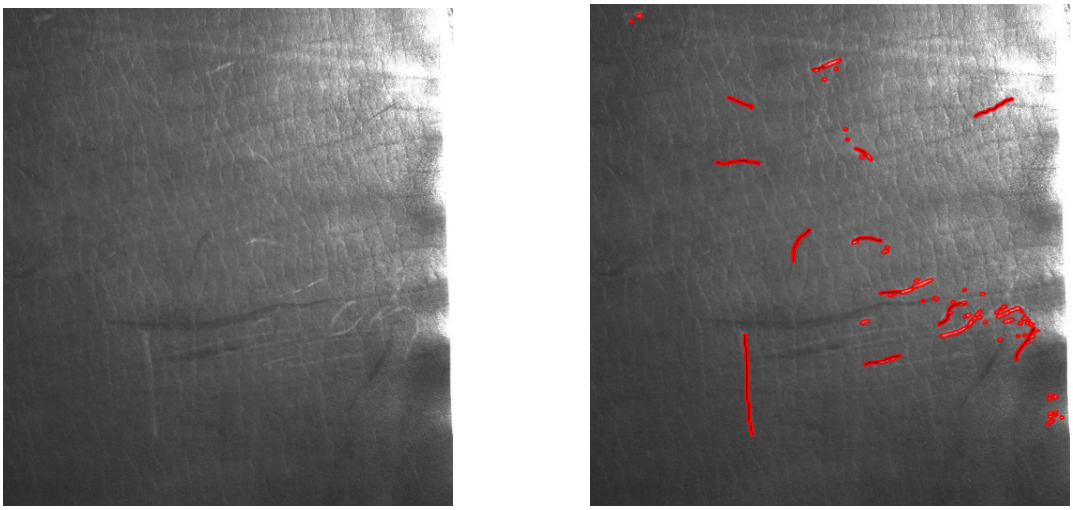
Применение вышеописанной формулы позволит устранить перепады яркости, вызванные неравномерной подсветкой. На рисунках 4*а* и 4*б* приведены устранение перепадов яркости.

Результаты. На рисунке 5*а* приведен пример фрагмента кожи, на рисунке 5*б* – результат определения дефектов с использованием вейвлета Габора.



а) *б)*

Рисунок 4 – Результат: а – фрагмент кожи: б – фрагмент кожи с устранением перепадов яркости



а) *б)*

Рисунок 5 – Фрагмент кожи: а – исходный фрагмент, б – результат выполнения

Обсуждение. Для того, чтобы оценить эффективность фильтра Габора, были подготовлены 4 фрагмента (*F*1, *F*2, *F*3, *F*4) с различными видами дефектов.

В качестве видов дефектов рассматривались:

– D1: Лизуха (Мелкие параллельные царапины на лицевой поверхности кожи)

– D2: Роговина (Глубокий, широкий заживший шрам удлиненной формы на лицевой поверхности кожи)

– D3: Бактериальность поверхностная (Порок в виде мелких неглубоких точек с нарушением лицевого слоя.)

– D4: Жилистость (порок в виде ветвеобразного рисунка от следов кровеносных сосудов.)

– D5: Стяжка (порок в виде волнистых складок или морщин на лицевой поверхности кожи.)

В таблице 2 представлены различные виды дефектов, которые были обнаружены с помощью фильтра Габора.

Таблица 2 – Оценка детектирование факта дефекта

Виды дефекты	Обнаружения дефектов на фрагментах							
	Результат работы				Ручная разметка			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
D1	+	-	-	+	+	-	-	+
D2	-	+	+	-	-	-	-	-
D3	-	+	+	+	-	-	+	-
D4	-	-	+	-	-	-	-	-
D5	-	-	-	+	-	-	-	+

Примечание: в таблице знаки «+» / «-» укатают на наличие или отсутствие дефекта на фрагменте (вне зависимости от его размера и степени выраженности).

Чтобы численно проанализировать качество работы вейвлета Габора, было проведено сравнение количества дефектов на фрагменте коже 4 с количеством дефектов, полученных с помощью фильтра Габора (табл. 3).

Таблица 3 – Качество работы вейвлет Габора

Вид дефекта	Количество дефектов	Количество дефектов, обнаруженных с помощью фильтра Габора.	Точность (%)	Время выполнения (мс)
D1	25	19	76%	15
D3	108	77	71%	15
D5	33	24	73%	15

Вейвлет Габора предоставляет хорошую точность (>70%) с умеренным временем выполнения (15 мс).

Метрика *IoU* используется для оценки качества сегментации или детекции объектов на изображениях [13]. *IoU* определяется как отношение площади пересечения предсказанной и истинной областей к площади их объединения:

$$IoU = \frac{\text{площадь пересечение}}{\text{площадь объединение}}$$

В таблице 4 представлено сравнение по *IoU* и скорости работы между вейвлета Гарбора и других методов.

Таблица 4 – Сравнение по IoU и скорости работы

Метод	IoU (%)	Время выполнения (мс)
Вейвлет Габора	75%	15
Нейронные сети	90%	300
Анализ по цвету	65%	20
Преобразование Фурье	70%	40
Преобразование Уолша	68%	35
Локальные двоичные шаблоны	73%	25

Вейвлет Габора: предоставляет хорошую точность (75% *IoU*) с умеренным временем выполнения (15 мс).

Нейронные сети: демонстрируют наилучшую точность (90% *IoU*), но требуют значительно большего времени на обработку (300 мс). Этот метод лучше всего подходит для сложных задач, где высокая точность критически важна.

Анализ по цвету: быстрейший метод (20 мс) с относительно низкой точностью (65% *IoU*).

Преобразование Фурье: предоставляет баланс между точностью (70% *IoU*) и временем выполнения (40 мс). Подходит для анализа частотных характеристик изображения.

Преобразование Уолша: имеет схожую с преобразованием Фурье точность (68% *IoU*) и немного быстрее в выполнении (35 мс).

Локальные двоичные шаблоны: предлагает хорошую точность (73% *IoU*) и быстрое выполнение (25 мс).

Выводы. В рамках данной работы был разработан программно-аппаратный комплекс для определения сорта кожи и выявления различного вида дефектов. Разработанная тестовая установка преобразует в цифровой формат фрагмент кожи для его последующей обработки, а именно выявление дефектов или их отсутствия. В разработанной тестовой установке используется подсветка, которая позволяет отцифровывать фрагменты кожи при различных видах освещенности.

Разработанная система автоматического обнаружения представляет собой комплексное решение для автоматического обнаружения дефектов на кожевенных заготовках. Сейчас разрабатывается специальная установка, которая позволит в дальнейшем исследовать целую кожу (≈ 2,5х4 м.) не более, чем за 15 секунд.

Таким образом, применение вейвлета Габора демонстрирует высокие показатели эффективности обработки сложных дефектов, при этом сохраняя высокую производительность. Уже сейчас достигнуты высокие показатели точности при обнаружении большинства распространённых дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горяинов В.А., Козлов А.В. Применение методов обработки изображений для анализа дефектов кожевенных изделий // Современные технологии в производстве и обработке материалов. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 45-52.

2. Эйснер, М.И., & Савин, С.И. (2019). Автоматизация визуального контроля кожевенных материалов с использованием цветового анализа. Известия вузов. Прикладная математика и информатика, 27(2), 33-40.

3. Zhang, Q., Yang, L., Li, Y., & Wang, L. (2018). Automated defect inspection for leather surface using deep learning approach. Applied Sciences, 8(12), 2430.

4. Савельев Н.Н. Визуализация текстурных характеристик изображений // Системный анализ и информатика. – 2016. – № 3. – С. 45-52.

5. Николаев, М. П., Зайцева, Е. С. Методы и алгоритмы текстурного анализа изображений. Казань: Казанский федеральный университет, 2020.

6. Захаров В.А. Преобразование Фурье и его применение в обработке сигналов и изображений // Вестник Томского государственного университета. – 2016. – № 1. – С. 102-112.

7. Волков В.А., Петрова Т.Ю. Применение преобразования Уолша в обработке изображений // Вестник МГТУ. – 2017. – Т. 29, № 4. – С. 102-111.

8. Xia M., Liu J., Ma X., et al. A hybrid LBP and feature fusion approach for skin lesion classification // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2018. – Vol. 53. – P. 117-126.

9. Liu, F., He, X. Image texture recognition using Gabor wavelets and their extension to multiple scales // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – 2019. – Vol. 33, Issue 9. – P. 1955013.

10. Lee H., Lee J., Park H. Automatic inspection system for surface defects of leather materials based on wavelet transform and machine learning // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 30. – P. 178-186.

11. Xu L., Chen X. Application of wavelet transform in surface defect detection of leather materials // Journal of Imaging Science and Technology. – 2016. – Vol. 60, Issue 3. – P. 031302.

12. Обработка изображений в многоспектральных системах технического зрения / А.И. Ефимов, Л.Н. Костяшкин, А.А. Логинов [и др.] // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 60. – С. 83-92. – DOI 10.21667/1995-4565-2017-60-2-83-92. – EDN YSRVEZ.

13. Тарасов, А.С. Применение сверточных сегментационных нейронных сетей для экологического мониторинга земной поверхности / А.С. Тарасов, М.Б. Никифоров, Н.И. Бакамбис // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 6. – С. 3-10. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-6-3-10. – EDN TCWCCB.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 664.061.3:634.723.1:547.973
EDN: MUUNBL

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕКТИНАЗЫ ДЛЯ ЭКСТРАГИРОВАНИЯ АНТОЦИАНОВ ИЗ ЯГОДНОГО СЫРЬЯ

© Автор(ы) 2025

SPIN-код: 2014-4031
Author ID: 833120
ORCID: 0000-0001-5972-6904
Scopus ID: 57132316900

ЧЕСНОКОВА Наталья Юрьевна, доктор технических наук, доцент,
профессор Базовой кафедры пищевой и клеточной инженерии Передовой инженерной школы
«Институт биотехнологии, биоинженерии и пищевых систем»
Дальневосточный федеральный университет
(690000, Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс 10, e-mail: chesnokova.nyu@dvfu.ru)

SPIN-код: 6625-3799
Author ID: 641061
ORCID: 0000-0003-1320-1787
Scopus ID: 57201425207

КУЗНЕЦОВА Алла Алексеевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент Базовой кафедра пищевой и клеточной инженерии Передовой инженерной школы
«Институт биотехнологии, биоинженерии и пищевых систем»
Дальневосточный федеральный университет
(690000, Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс 10, e-mail: kuznetsova.aa@dvfu.ru)

SPIN-код: 4039-8657
AuthorID: 119822
ORCID: 0000-0002-6585-0546
Scopus ID: 57201430691

ПРИХОДЬКО Юрий Вадимович, доктор технических наук, профессор,
профессор Базовой кафедры биологической и биохимической инженерии Передовой инженерной школы
«Институт биотехнологии, биоинженерии и пищевых систем»
Дальневосточный федеральный университет
(690000, Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс 10, e-mail: prikhodko.yuv@dvfu.ru)

Аннотация. В ходе проведенного исследования была показана эффективность использования ферментативного гидролиза с применением пектиназы для извлечения антоциановых пигментов из ягод черной смородины. Выявлено, что наибольшая степень экстракции достигается при применении 4% раствора пектиназы, при этом концентрация антоцианов в экстракте составляет 464,16 мг/л. Понижение дозировки фермента сопровождается пропорциональным снижением эффективности экстракции антоцианов. При концентрациях пектиназы 3, 2 и 1% содержание антоцианов снижается соответственно на 7, 12 и 15%. Анализ влияния продолжительности гидролиза на результативность процесса выявил, что пик концентрации антоцианов достигается через 60 мин обработки (478,35 мг/л), что на 50% превышает показатели водной экстракции. Дальнейшее увеличение времени обработки до 120 и 180 мин приводит к снижению выхода целевых компонентов до 448,62 и 379,60 мг/л, соответственно. Полученный в результате ферментативного гидролиза антоциановый экстракт послужил основой для создания красящей композиции. Модификация технологии позволила получить продукт в виде свободно сыпучих гранул, что значительно упрощает его применение в пищевой промышленности. Итогом примененной технологии стало получение красящей композиции на основе антоцианов в виде сыпучих гранул, отличающихся удобством дозирования и пригодностью для использования в пищевой промышленности. Дополнительно установлено, что готовая композиция обладает легким ароматом черной смородины, имеет полную гидрофильность и содержит 553,79 мг/л антоцианов.

Ключевые слова: ягоды черной смородины, антоцианы, ферментативный гидролиз, пектиназа, красящая композиция.

EFFICIENCY OF USING PECTINASE FOR EXTRACTING ANTHOCYANINS FROM BERRY RAW MATERIALS

© The Author(s) 2025

CHESNOKOVA Natalya Yurievna, doctor of technical sciences,
professor of the Basic Department of Food and Cell Engineering of the Advanced Engineering School
Far Eastern Federal University
(690000, Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax 10, e-mail:chesnokova.nyu@dvfu.ru)

KUZNETSOVA Alla Alekseevna, candidate of technical sciences,

associate professor of the Basic Department of Food and Cell Engineering of the Advanced Engineering School
Far Eastern Federal University
(690000, Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax 10, e-mail: kuznetsova.aa@dvfu.ru)
PRIKHODKO Yuri Vadimovich, doctor of technical sciences,
professor of the Basic Department of Biological and Biochemical Engineering of the Advanced Engineering School
Far Eastern Federal University
(690000, Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax 10, e-mail: prikhodko.yuv@dvfu.ru)

Abstract. The study demonstrated the efficiency of enzymatic hydrolysis using pectinase to extract anthocyanin pigments from blackcurrant berries. It was found that the highest extraction efficiency was achieved using a 4% pectinase solution, with the anthocyanin concentration in the extract being 464.16 mg/l. A decrease in the enzyme dosage was accompanied by a proportional decrease in the anthocyanin extraction efficiency. At pectinase concentrations of 3, 2 and 1 %, the anthocyanin content decreased by 7, 12 and 15%, respectively. An analysis of the effect of hydrolysis duration on the process efficiency revealed that the peak anthocyanin concentration was achieved after 60 min of treatment (478.35 mg/l), which was 50% higher than the results of water extraction. A further increase in treatment time to 120 and 180 min resulted in a decrease in the yield of target components to 448.62 and 379.60 mg/l, respectively. The anthocyanin extract obtained as a result of enzymatic hydrolysis served as the basis for creating a coloring composition. Modification of the technology allowed to obtain a product in the form of free-flowing granules, which significantly simplifies its use in the food industry. The result of the applied technology was the production of a coloring composition based on anthocyanins in the form of free-flowing granules, which are easy to dose and suitable for use in the food industry. Additionally, it was found that the finished dye has a light aroma of black currant, is fully hydrophilic and contains 553.79 mg / l of anthocyanins.

Keywords: blackcurrant berries, anthocyanins, enzymatic hydrolysis, pectinase, coloring composition.

Для цитирования: *Чеснокова Н.Ю. Эффективность применения пектиназы для экстрагирования антоцианов из ягодного сырья / Н.Ю. Чеснокова, А.А. Кузнецова, Ю.В. Приходько // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 104-110. – EDN: MUUNBL.*

Введение. Антоцианы – это природные пигменты, растворимые в воде, которые содержатся в вакуолях растительных клеток. Они определяют окраску различных частей растений: от цветков и плодов до стеблей, листьев и корневых систем, создавая спектр оттенков от красного до синего цвета [1]. Химическая природа антоцианов тесно связана с классом флавоноидов. Молекулярная структура этих соединений базируется на углеродном скелете *C*15, который состоит из двух ароматических бензольных колец. Эти кольца соединены между собой цепью из трех атомов углерода, формирующей γ-пироновое кольцо с участием атома кислорода [2,3]. Уникальная особенность всех антоциановых соединений заключается в присутствии в их структуре гетероциклического кольца с атомом четырехвалентного кислорода (оксония). Именно эта структурная характеристика определяет положительный заряд всей молекулы [2,3].

Практическое применение антоцианов обусловлено их интенсивной окрашивающей способностью. В пищевой индустрии эти природные пигменты используются как безопасные красители, которые не только улучшают внешний вид продукции, но и обогащают ее полезными свойствами. Современные исследования демонстрируют растущий интерес к антоцианам в медицинской и фармацевтической сферах. Эпидемиологические исследования подтверждают наличие у этих соединений выраженного антирадикального действия. Это открывает перспективы их применения в профилактике онкологических заболеваний, замедлении процессов старения и борьбе с различными дегенеративными патологиями [3,4].

В современной науке и промышленности активно разрабатываются различные подходы к извлечению антоциановых пигментов из природного растительного материала. Существующие технологии включают в себя методы с применением сверхкритических флюидов, а также инновационные способы с использованием ультразвукового и микроволнового воздействия. Эти методики демонстрируют высокую эффективность при выделении красящих веществ из растительных объектов. Тем не менее классическим и наиболее часто применяемым способом остается экстракция при помощи растворителей. Данный метод широко используется для получения антоцианов из различных частей растений, включая плоды и овощи. Однако этот подход имеет существенные ограничения. Прежде всего, вызывает опасение токсичность применяемых растворителей, что может негативно сказываться на безопасности конечного продукта. Кроме того, из-за специфического расположения антоцианов в вакуолях клеток затруднено их полное извлечение водой и органическими растворителями из-за ограниченной способности проникать через клеточные мембраны, что снижает общий выход биологически активных веществ [5,6].

В пищевой промышленности давно зарекомендовала себя ферментативная экстракция, которая успешно применяется для увеличения выхода сока при переработке фруктов, а также в производстве таких продуктов, как сыры, кукурузные сиропы

и другие пищевые изделия [7-13]. В последнее время этот подход активно адаптируется для обработки растительного сырья с целью разрушения клеточных структур и повышения выхода ценных внутриклеточных компонентов [14-16]. Для ферментативного извлечения антоцианов применяются различные гидролитические ферменты, включая пектиназы, целлюлазы, протеазы и амилазы. Эти ферменты эффективно разрушают клеточные стенки растений, что способствует высвобождению внутриклеточного содержимого, в том числе биологически активных соединений.

Исследования современной научной литературы демонстрируют значительную зависимость результативности процесса извлечения биологически активных веществ от комплекса технологических параметров при применении ферментных систем. Ключевыми факторами, определяющими эффективность процесса экстрагирования, являются специфика используемого ферментативного препарата, его оптимальная концентрация, температурный режим, а также продолжительность ферментативной обработки сырья [17-18]. В связи с этим особую значимость приобретает разработка научно обоснованных подходов к подбору ферментных композиций и оптимизации технологических режимов, направленных на достижение максимального выхода антоцианов из растительных клеток. Кроме того, существенной проблемой является изучение характера воздействия ферментативной обработки на физико-химические характеристики и колористические свойства получаемых красящих композиций на основе антоцианов, что требует детального исследования в рамках данной проблематики.

Методология. Целью данной работы является обоснование целесообразности применения фермента пектиназы для повышения эффективности извлечения антоцианов из ягодного сырья, а также выявление преимуществ использования полученных экстрактов при производстве красящих композиций.

В рамках данной работы были изучены экстракты антоцианов, полученные методом ферментативной обработки ягод черной смородины, а также натуральная красящая композиция на основе выделенных экстрактов.

Исходным материалом для проведения экспериментов послужили ягоды черной смородины (*Ribes nigrum L.*). Замороженные плоды проходили предварительную подготовку, включающую естественную разморозку при комнатной температуре до полного оттаивания и механическую обработку в блендере до получения однородной массы.

Процесс экстрагирования осуществлялся с применением дистиллированной воды и 95%-ного этанола. Водную экстракцию проводили при 25, 60 и 100°С. Спиртовая экстракция проводилась при комнатной температуре. Во всех экспериментальных сериях соблюдалось постоянное соотношение сырья и экстрагента 1:1. Длительность процесса варьировалась от 30 до 60 мин при непрерывном перемешивании массы.

В ходе экспериментального исследования был применен ферментативный гидролиз с использованием пектиназы производства российской компании «Торговый дом Биопрепарат». Фермент характеризовался активностью 30 ед/г, оптимальными условиями действия при *pH* 3,7-4,3 и температуре 35-50°С. Ферментативная экстракция антоцианов проводилась в ацетатно-буферной среде с *pH* 4,01. Концентрация фермента в растворе варьировалась в пределах 1-4%. Процесс гидролиза длился от 60 до 180 мин при температуре 50°С.

Для определения эффективности действия пектиназы был проведен специальный эксперимент по ферментативному гидролизу пектина. УФ-спектры пектиновых растворов до и после ферментативной обработки представлены на рисунке 1.

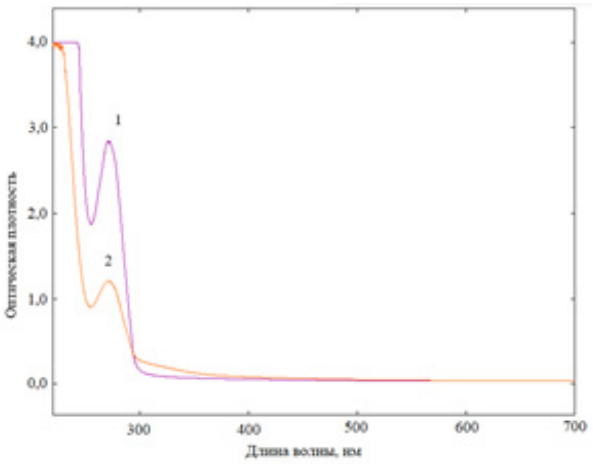


Рисунок 1 – УФ-спектры пектиновых растворов до (1) и после ферментативного гидролиза пектиназой (2)

В ходе эксперимента была продемонстрирована значительная каталитическая способность пектиназы. Результаты исследования показали существенное снижение концентрации пектиновых соединений в растворе после ферментативной обработки, что свидетельствует об уменьшении показателя поглощения пектиновых веществ более чем в два раза.

В качестве базовой технологии при разработке производственного процесса красящей композиции на основе антоцианов была использована ранее успешно апробированная методика [19]. С целью получения продукта в твердофазном состоянии в технологическую схему производства красящей композиции была введена дополнительная стадия лиофильной сушки. Данная операция осуществлялась на установке Martin Christ Alpha 2-4 LSCplus (производство Германия).

Для количественного определения содержания антоцианов в полученных образцах была применена методика, описанная в научном исследовании Ivano-

va с соавт. [20].

В процессе исследования была реализована методика четырехкратных измерений, после чего производился расчет стандартного отклонения экспериментальных данных.

Результаты. Поскольку наиболее эффективными экстрагентами для извлечения биологически активных веществ из ягодного сырья считаются вода и органические растворители [21, 22], в работе были реализованы две методики экстракции антоцианов, включающие водную экстракцию с изменением температурного режима и экстракцию 95% этанолом при температуре окружающей среды.

В рамках исследования были получены УФ-спектры растворов антоцианов, экстрагированных из ягод черной смородины разными растворителями и при различных температурных параметрах экстракции (рис. 2). Соответствующие количественные характеристики содержания антоцианов отражены в таблице 1.

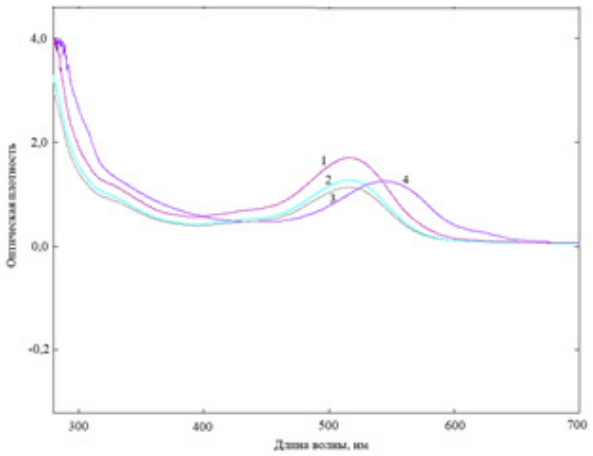


Рисунок 2 – УФ-спектры антоциановых экстрактов в зависимости от типа экстрагента и температуры экстрагирования (водой при 60 (1), 100 (2) и 25°С (3), 95% этиловым спиртом при 25°С (4))

Таблица 1 – Количественные характеристики содержания антоцианов, выделенных из ягод черной смородины различными растворителями при разных температурных режимах экстрагирования

№ образца	Экстрагент	Температура, °С	Содержание антоцианов, мг/л
1	Вода	60	357,71±0,01
2	Вода	100	263,73±0,01
3	Вода	25	236,79±0,02
4	95% этиловый спирт	25	270,10±0,01

Для повышения эффективности извлечения биоактивных веществ из растительных клеток была применена методика ферментативной экстракции антоцианов из ягодного сырья. При выборе фермента учитывался химический состав черной смородины, особенностью которого является значительное присутствие высокоэтерифицированных пектиновых соединений в клеточных стенках. В литературных источниках отмечено, что их суммарная доля составляет более 14,9% [23]. Для осуществления гидролиза использовали пектиназу, которая благодаря своей способности к гидролитическому расщеплению пектиновых компонентов обеспечивает разрушение клеточных оболочек и способствует более полному извлечению биологически активных веществ.

Учитывая значительное влияние концентрации ферментного препарата на эффективность извлечения антоцианов, в ходе исследования были определены оптимальные дозировки пектиназы. Результаты спектрального анализа в УФ-диапазоне для растворов антоцианов, экстрагированных из ягод черной смородины с применением 1-4% растворов пектиназы, представлены на рисунке 3. Количественные параметры содержания антоцианов при варьировании концентраций фермента отражены в таблице 2.

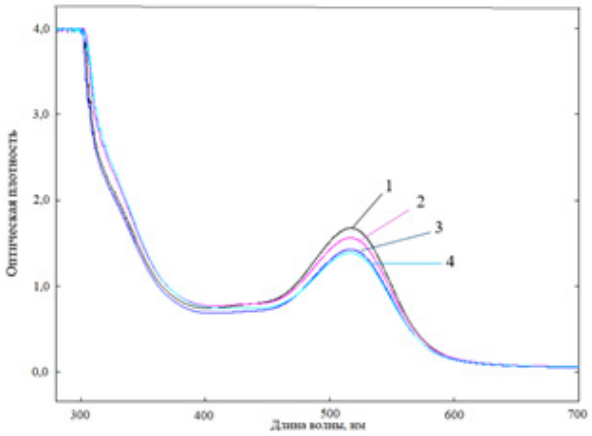


Рисунок 3 – УФ-спектры антоциановых экстрактов в зависимости от концентрации пектиназы (4% (1), 3% (2), 2% (3), 1% (4)) в условия экстракции 60 мин при температуре 50°С, pH среды 4,01

Таблица 2 – Количественные параметры содержания антоцианов при варьировании концентраций фермента

№ образца	Концентрация фермента пектиназы,%	Содержание антоцианов, мг/л
1	4	464,16±0,01
2	3	435,55±0,01
3	2	410,58±0,02
4	1	396,27±0,01

В связи с определяющей ролью продолжительности ферментативного гидролиза в процессе экстракции, проведено исследование зависимости эффективности извлечения антоцианов из ягод черной смородины от длительности обработки. Результаты спектрального анализа в УФ-диапазоне для растворов антоцианов, полученных при обработке 4% раствором пектиназы при температуре 50°С в течение 60-180 мин, представлены на рисунке 4. Для сравнения осуществлена экстракция водным раствором при температуре 70°С продолжительностью 180 мин. Данные о

количественном содержании антоцианов при обработке 4% раствором пектиназы при 50°С в диапазоне 60-180 мин систематизированы в таблице 3.

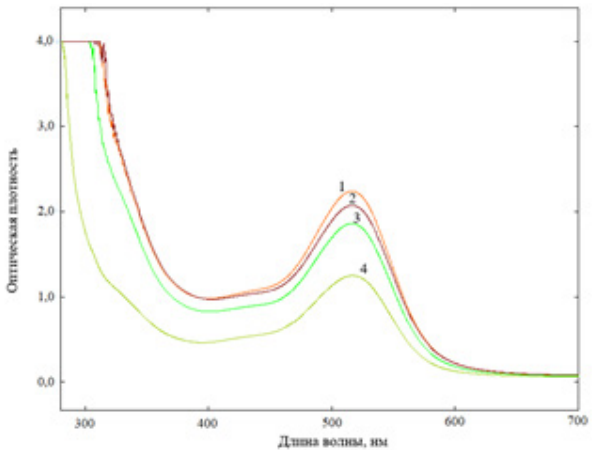


Рисунок 4 – УФ-спектры антоциановых экстрактов, выделенных 4% раствором пектиназы в течение 60 (1), 120 (2), 180) мин (3) и водным раствором без фермента (4)

Биологически активные антоциановые экстракты, обладающие выраженной окрашивающей способностью и широким спектром биотехнологических свойств, рассматриваются как перспективное сырье для производства натуральных красящих композиций [24,25]. Существенное значение при этом имеет выбор технологической схемы производства.

Базовой технологией при разработке производственного процесса красящей композиции послужила ранее созданная технологическая схема [19]. Модификации технологического процесса коснулись этапа извлечения антоцианов, где традиционная методика экстракции растворителем была заменена на ферментативный метод с применением пектиназы.

В таблице 4 представлен комплексный анализ сенсорных и физико-химических показателей красящей композиции, полученной с использованием ферментативного гидролиза. Параллельно представлены результаты исследования качества красящей композиции, произведенной традиционным методом с применением водной экстракции.

На рисунке 5 отображены результаты визуального исследования образцов красящих композиций, полученных двумя технологическими способами: с применением ферментативного гидролиза и классической водной экстракции.

Таблица 3 – Количественное содержание антоцианов при обработке 4% раствором пектиназы при 50°С в диапазоне 60-180 мин

№ образца	Экстрагент	Продолжительность экстрагирования, мин	Содержание антоцианов, мг/л
1	4% раствор пектиназы	60	478,35±0,01
2	4% раствор пектиназы	120	448,62±0,01
3	4% раствор пектиназы	180	379,60±0,02
4	Вода	180	310,90±0,01

Таблица 4 – Комплексный анализ сенсорных и физико-химических показателей красящих композиций, полученных из ягод черной смородины с использованием ферментативной и водной экстракций

Показатель	Красящая композиция, полученная с использованием ферментативной экстракции	Красящая композиция, полученный в результате водной экстракции
Сенсорные характеристики		
Внешний вид и цвет	рассыпчатые гранулы размером 1-2 мм ярко красного цвета	вязко-тягучая масса ярко красного цвета
Запах	едва уловимый смородиновый аромат	едва уловимый смородиновый аромат
Вкус	ягодно-кислый	ягодно-кислый
Физико-химические показатели		
Содержание антоцианов, мг/л	553,79±0,01	400,88±0,01
Растворимость в воде	абсолютная растворимость	абсолютная растворимость

а) *б)*

Рисунок 5 – Внешний вид красящих композиций, полученных с использованием ферментативного гидролиза (а) и экстракции антоцианов водным раствором (б)

Обсуждение. Исследование результатов эксперимента, отраженных на графике (рис. 2), позволило установить оптимальные параметры процесса экстрагирования антоциановых пигментов из ягод черной смородины. Проведенный эксперимент выявил, что вода демонстрирует наилучшие показатели в качестве экстрагента при работе с ягодным сырьем. Наиболее благоприятные условия для извлечения антоцианов создаются при термической обработке водного раствора до отметки 60°С. При данной температуре фиксируется максимальная концентрация целевых веществ – 357,71 мг/л. Отклонение от оптимальной температурной отметки в любую сторону приводит к снижению эффективности процесса экстракции. При понижении температуры до комнатной (25°С) концентрация антоцианов в растворе составляет 236,79 мг/л, а при кипячении (100°С) – 263,73 мг/л. Анализ полученных данных позволяет предположить, что снижение эффективности при низких температурах связано с неполным разрушением клеточных структур растительного материала, что затрудняет высвобождение пигментов. В то же время повышение температуры выше оптимального уровня вызывает деструктивные процессы в молекулах антоцианов, приводящие к частичной потере их активности.

В работе было показано, что использование 95%-ного этанола в качестве экстрагента позволяет получить экстракт с концентрацией антоцианов 270,10 мг/л. Данный показатель существенно уступает результату водной экстракции при температуре 60°С, демонстрируя примерно полуторакратное снижение эффективности извлечения целевых компонентов. Примечательно, что применение спиртового растворителя сопровождается изменением спектральных характеристик экстракта. Наблюдается значительное смещение пика поглощения в длинноволновую область спектра с 515 до 540 нм. Подобное смещение спектра поглощения обусловлено изменением характера среды экстракции и ее полярности.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о превосходстве воды над спиртовыми растворами в качестве экстрагента антоциановых пигментов из ягодного сырья. Оптимальные условия экстракции достигаются при температуре 60°С, что находится в полном соответствии с данными научной литературы [26]. В опубликованных исследованиях также подтверждается высокая эффективность водной экстракции в температурном диапазоне 60-70°С для извлечения антоцианов.

Исследование влияния ферментативной обработки на эффективность извлечения антоциановых пигментов продемонстрировало значительные преимущества использования пектиназы в процессе экстракции. Экспериментальные данные (рис. 3) свидетельствуют о прямой зависимости между концентрацией фермента и степенью извлечения целевых компонентов из ягод черной смородины. Максимальная эффективность достигается при дозировке пектиназы 4%, что обеспечивает концентрацию антоцианов 464,16 мг/л в конечном растворе. При снижении концентрации фермента наблюдается пропорциональное уменьшение выхода пигментов. При концентрации пектиназы 3, 2 и 1% происходит снижение выхода антоцианов в раствор на 7, 12 и 15%, соответственно.

Анализ продолжительности ферментативного воздействия (рис. 4) выявил оптимальную длительность процесса в 60 мин. В этих условиях фиксируется наивысшая концентрация антоцианов – 478,35 мг/л, что демонстрирует 50%-ное превосходство над показателями классической водной экстракции. При дальнейшем увеличении времени обработки до 120 и 180 мин отмечается снижение выхода целевых компонентов до 448,62 и 379,60 мг/л, соответственно.

Таким образом, применение пектиназы существенно повышает эффективность извлечения антоцианов из ягодного сырья. Наиболее результативной признана комбинация 4%-ной концентрации фермента с 60-мин продолжительностью процесса экстракции, обеспечивающая максимальный выход целевых компонентов.

В ходе эксперимента была модифицирована технология получения красящей композиции на основе антоцианов. Процесс включал ферментативную обработку сырья с использованием пектиназы, после чего осуществлялась серия ранее апробированных технологических операций.

Проведенный комплексный анализ полученной красящей композиции, охватывающий как сенсорные, так и физико-химические параметры (табл. 4) показал, что продукт имеет вид гранул с размером частиц 1-2 мм темно-красного цвета, обладающих полной гидрофильностью.

Проведенные исследования демонстрируют существенные достоинства использования ферментативного гидролиза с применением пектиназы при производстве красящих композиций для пищевого назначения. Сравнительный анализ полученных результатов выявил несколько ключевых преимуществ данного подхода. Во-первых, содержание антоцианов в готовом продукте превышает показатели, полученные при традиционной водной экстракции на 27%. Во-вторых, конечный продукт приобретает гранулированную структуру, в отличие от вязко-тягучей консистенции, характерной для экстрактов без ферментативной обработки (рис. 5). Механизм формирования гранулированной формы обусловлен особенностями воздействия пектиназы на растительные ткани. В процессе ферментативного расщепления происходит деструкция пектиновых веществ, которые естественным образом присутствуют в клеточных стенках растений и обладают выраженными желирующими свойствами [27]. При классическом методе экстракции без ферментативной обработки в конечный продукт попадают не только антоцианы, но и значительное количество пектинов. Именно эти вещества формируют характерную вязкую консистенцию готового экстракта. Процесс гидролиза пектинов, посредством пектиназы, приводит

к их превращению в водорастворимые полигалактуроновые кислоты, что существенно снижает желирующие свойства продукта. Благодаря этому процессу становится возможным получение красящих композиций в виде свободно сыпучих гранул, что значительно упрощает их применение в пищевой промышленности и обеспечивает удобство дозирования при производстве.

Выводы. В рамках проведенного исследования была успешно апробирована методика извлечения антоциановых соединений из ягодного сырья посредством ферментативного гидролиза с применением препарата пектиназы. Экспериментальным путем установлено оптимальное содержание ферментного препарата. Максимальная эффективность процесса достигается при концентрации 4% раствора пектиназы. При снижении дозировки фермента до 3-1% наблюдается существенное уменьшение выхода целевых компонентов. Потери составляют от 7 до 15% антоцианов. Исследование временных параметров процесса показало, что наилучший результат по содержанию антоцианов достигается при продолжительности гидролиза 60 мин. Данный показатель демонстрирует превосходство над традиционной водной экстракцией на 50%. Увеличение длительности обработки до 120 и 180 мин приводит к обратному эффекту – снижению выхода ценных соединений. Полученный в результате ферментативного гидролиза антоциановый экстракт послужил основой для создания красящей композиции. Модифицированная технология позволила получить продукт в виде свободно сыпучих гранул, что значительно упрощает его применение в пищевой промышленности. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения данной технологии для промышленного производства красящих композиций на основе антоцианов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Saigo T., Wang T., Watanabe M., Tohge T. Diversity of anthocyanin and proanthocyanin biosynthesis in land plants // Current Opinion in Plant Biology. 2020. Vol. 55. – P. 93-99.

2. Cai D., Li X., Chen J. et al. A comprehensive review on innovative and advanced stabilization approaches of anthocyanin by modifying structure and controlling environmental factors // Food Chemistry. 2022/ Vol. 366/ A. 130611.

3. Wang M., Zhang Z., Sun H. et al. Research progress of anthocyanin prebiotic activity: a review // Phytomedicine. 2022. Vol. 102. – A. 154145.

4. Chen J., Xu B., Sun J., Jiang X., Bai W. Anthocyanin supplement as a dietary strategy in cancer prevention and management: a comprehensive review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. – Vol. 62(2). – P. 7242-7254.

5. Tan J., Han Y., Han B., Qi X., Cai X., Ge S., Xue H. Extraction and purification of anthocyanins: A review // Journal of Agriculture and Food Research, 2022. Vol. 8. – A. 100306.

6. Silva S., Costa E.M., Calhau C., Morais R.M., Pintado M.E. Anthocyanin extraction from plant tissues: A review // Critical reviews in food science and nutrition. – 2017. – Vol. 57(14). – P. 3072-3083.

7. Azimi S.Z., Hosseini S.S., Khodaiyan F. Continuous Clarifcation of Grape Juice Using a Packed Bed Bioreactor Including Pectinase Enzyme Immobilized on Glass Beads // Food Bioscience. – 2021. – Vol. 40. – A. 100877.

8. Dutra M.D.C.P., Brito Araújo Carvalho A.J.D., Santos N.C., Freitas S.T.D., Ferreira E.D.S., Marques A.T.B., Lima M.D.S. Impact of Commercial Preparations of Pectinases on the Chemical Composition and Stability of Phenolic Compounds in Grape Juices // Journal of Food Biochemistry. – Vol. 1. – A. 2856691.

9. Aktayeva S., Akishev Z.H., Khassenov B. Proteolytic enzymes in cheese making // Eurasian Journal of Applied Biotechnology, 2018. – Vol. 1.

10. Li L., Pei Y., Cheng K., Deng Y., Dong X., Fang R., Xiao, G. Production and evaluation of enzyme-modified cheese adding protease or lipase to improve quality properties // Journal of bioscience and bioengineering. 2023. Vol. 135(5). – P. 389-394.

11. Fatourehchi F., Farrokhi F., Eyvazzadeh O., Bahadori A., Sayed Yaghoubi A. Production of glucose syrup through enzymatic hydrolysis of flint and floury corn flour mixtures and evaluating its properties as cost-effective syrup // Journal of food science and technology (Iran). 2022. Vol. 19(129). – P. 23-39.

12. Musdalifa M., Laga A., Rahman A.N. Glucose syrup production through enzymatic methods and acid hydrolysis using different starch sources: a systematic review // Journal of Food Measurement and Characterization. 2024. Vol. 18(11). – P. 8976-8992.

13. Yang S., Wu C., Yan Q., Li X., Jiang Z. Nondigestible functional oligosaccharides: Enzymatic production and food applications for intestinal health // Annual Review of Food Science and Technology. 2023. Vol. 14(1). – P. 297-322.

14. Marathe S.J., Jadhav S.B., Bankar S.B., Dubey K.K., Singhal R.S. Improvements in the extraction of bioactive compounds by enzymes // Current Opinion in Food Science. 2019. Vol. 25. – P. 62-72.

15. Łubek-Nguyen A., Ziemichód W., Olech M. Application of enzyme-assisted extraction for the recovery of natural bioactive compounds for nutraceutical and pharmaceutical applications // Applied Sciences. 2022. – Vol. 12(7). – A. 3232.

16. Wen L., Zhang Z., Sun D.W., Sivagnanam S.P., Tiwari B.K. Combination of emerging technologies for the extraction of bioactive compounds // Critical reviews in food science and nutrition. 2020. Vol. 60(11). – P. 1826-1841.

17. Hammed A.M., Jaswir I., Amid A., Alam Z., Asiyanbi-H T.T., Ramli N. Enzymatic hydrolysis of plants and algae for extraction of bioactive compounds // Food Reviews International. 2013. Vol. 29(4). – P. 352-370.

18. Krakowska-Sieprawska A., Rafińska K., Walczak-Skierska J., Buszewski B. The influence of plant material enzymatic hydrolysis and extraction conditions on the polyphenolic profiles and antioxidant activity of extracts: A green and efficient approach // Molecules. 2020. Vol. 25(9). – A. 2074.

19. Чеснокова, Н.Ю., Приходько Ю.В., Левочкина Л.В., Кузнецова А.А., Фадеева М.Е. Натуральный концентрированный краситель, содержащий комплекс антоциановых пигментов и пектиновых веществ // Вестник КрасГАУ. 2019. – №12. – С. 160-168.\

20. Ivanova, V.; Dornyei, A.; Mark, L.; Vojnoski, B.; Stafilov, T.; Stefova, M.; Kilar, F. Polyphenolic Content of Vranec Wines Produced by Different Vinification Conditions. Food Chemistry. 2011. Vol. 124, Iss. 1. – P. 316-325. DOI: 10.1016/j. foodchem.2010.06.039.

21. Taghavi T., Patel H., Rafie R. Extraction solvents affect anthocyanin yield, color, and profile of strawberries // Plants. – 2023. – Vol. 12(9). – A. 1833.

22. Jeyaraj E.J., Lim Y.Y., Choo W.S. Effect of organic solvents and water extraction on the phytochemical profile and antioxidant activity of Clitoria ternatea flowers // ACS Food Science & Technology. – 2021. – Vol. 1(9). – P. 1567-1577.

23. Тихонова О.А., Стрельцина С.А. Пектиновые вещества ягод черной смородины в условиях Северо-Запада России // Биология растений и садоводство: теория, инновации. – 2017. – № 144. – С. 239-243.

24. García-Salinas M.J., Ariza M.J. Optimizing a simple natural dye production method for dye-sensitized solar cells: examples for betalain (bougainvillea and beetroot extracts) and anthocyanin dyes // Applied Sciences. – 2019. Vol. 9(12). – A. 2515.

25. Pramananda V., Fityay T.A.H., Misran E. Anthocyanin as natural dye in DSSC fabrication: A review // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. – Vol. 1122(1) – P. 012104.

26. Чеснокова, Н.Ю., Левочкина Л.В., Приходько Ю.В., Кузнецова А.А. Влияние условий экстрагирования на степень извлечения антоцианового пигмента черной смородины // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. – 2019. – № 2(55). – С. 23-28.

27. Мясищева Н.В., Артемова Е.Н., Макаркина М.А. Желирующая способность пектинов свежих и замороженных ягод красной смородины // Техника и технология пищевых производств, 2017. – № 45(2). – С. 62-68.

Статья поступила в редакцию 01.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 664.661
EDN: KOIJQY

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЫКВЕННОГО ПОРОШКА НА КАЧЕСТВО РЖАНО-ПШЕНИЧНЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА РЖАНЫХ ЗАКВАСКАХ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 5145-1745
AuthorID: 1101199
ORCID: 0000-0003-0832-4547

ЛЕОНТЬЕВА Светлана Александровна, кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры «Биотехнологии и инжиниринга»
Уральский государственный экономический университет
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: sv-leo@bk.ru)

SPIN: 3587-8000
AuthorID: 895854
ORCID: 0009-0009-1706-1153

ГУЛОВА Тамара Ивановна, старший преподаватель кафедры «Биотехнологии и инжиниринга»
Уральский государственный экономический университет
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: gulovat@mail.ru)

Аннотация. Разработана рецептура изготовления ржано-пшеничных хлебобулочных изделий на основе ржаной закваски с добавлением тыквенного порошка. В работе проведены исследования влияния тыквенного порошка на органолептические, физико-химические показатели готовых хлебобулочных изделий. Все показатели внешний вид, цвет, запах, мякиш, вкус, пористость, влажность, кислотность соответствовали нормам ГОСТ 31807-2012 Изделия хлебобулочные из ржаной и смеси ржаной и пшеничной муки. Общие технические условия. Добавление тыквенного порошка привело к увеличению суммарного содержания незаменимых аминокислот в опытном хлебе на 10% по сравнению с контрольным. Было определено оптимальное соотношение муки и порошка тыквы Испытания проводили с внесением тыквенного порошка в тесто в количестве 1,0%, 3,0%, 5,0%, 7,0% и 10,0% к массе муки. В процессе исследований было определено, что для улучшения свойств, таких как пористость, влажность, вкус, аромат, а также обогащения минералами хлеба на ржаных заквасках требуется оптимальное количество тыквенного порошка в количестве 7%.

Ключевые слова: хлебобулочные изделия, тыквенный порошок, ржано-пшеничное тесто, закваска, пищевая ценность.

A STUDY OF THE IMPACT OF PUMPKIN ON THE QUALITY OF BAKERY PRODUCTS DERIVED FROM RYE SOURDOUGH STARTER

© The Author(s) 2025

LEONTIEVA Svetlana Aleksandrovna, candidate of Technical Sciences,
senior lecturer at the Department of Biotechnology and Engineering
Ural State University of Economics
(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 Marta/Narodnaya Voli Street, 62/45, e-mail: sv-leo@bk.ru)

GULOVA Tamara Ivanovna, senior lecturer at the Department of Biotechnology and Engineering
Ural State University of Economics
(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 Marta/Narodnaya Voli Street, 62/45, e-mail: gulovat@mail.ru)

Abstract. The recipe for making rye-wheat bakery products based on rye starter with the addition of pumpkin powder has been developed. The paper studies the effect of pumpkin powder on the organoleptic and physical and chemical properties of finished bakery products. All indicators of appearance, color, smell, crumb, taste, porosity, humidity, and acidity met the requirements of GOST 31807-2012 "Bread and cake products made from rye and mixed rye and wheat flour. General Technical Conditions". The addition of pumpkin powder increased the total content of essential amino acids in the experimental bread by 10% compared to the control bread. The optimal ratio of flour and pumpkin powder was determined. The tests were conducted by adding pumpkin powder to the dough in amounts of 1.0%, 3.0%, 5.0%, 7.0%, and 10.0% of the flour weight. During the research, it was determined that an optimal amount of pumpkin powder of 7% is required to improve the properties such as porosity, moisture content, taste, and aroma, as well as to enrich the minerals in rye-based bread.

Keywords: bakery products, pumpkin powder, rye-wheat dough, sourdough, nutritional value.

Для цитирования: *Леонтьева С.А. Изучение влияния тыквенного порошка на качество ржано-пшеничных хлебобулочных изделий на ржаных заквасках / С.А. Леонтьева, Т.И. Гулова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 111-116. – EDN: KOIJQY.*

Введение. В связи с новыми тенденциями и спросом потребителей, рекомендуется расширение ассортимента хлебобулочных изделий. В настоящее время потребители отдают предпочтение не только вкусному хлебу, но и полезному.

Тыква *Cucurbita moschata* вызывает неподдельный интерес в данной области [1-3].

Введение тыквы в рецептуру хлебобулочных изделий позволит увеличить содержание незаменимых аминокислот., таких как лизина, валина и треонина, что напрямую указывает на повышение его биологической ценности, а их вкус и аромат улучшатся [4].

Ассортимент хлебобулочных изделий:

Существует множество видов хлеба ржаной, ржано-пшеничный, пшенично-ржаной или чисто пшеничный хлеб. Ассортимент хлебобулочной продукции может значительно изменяться в зависимости от типа муки, используемой в рецепте.

Процесс приготовления теста оказывает влияние на свойства готового продукта. Хлебобулочные изделия могут быть простыми, улучшенными или сдобными (с добавлением сахара). При формировании наименования готового изделия из смеси муки основное внимание уделяется преобладающему типу муки, массовая доля которой составляет 50%. Пшеничная мука используется в рецепте для улучшения структуры теста [5].

Ржано-пшеничный хлеб, выпускаемый по традиционной технологии, изготавливается из смеси ржаной обдирной муки и пшеничной муки первого сорта [6].

Ржано-пшеничный хлеб, приготовленный путем смешивания двух видов муки, является одним из самых популярных сортов хлеба в мире [7]. Этот вид хлеба имеет более высокую пищевую ценность, чем хлеб, приготовленный только из очищенной пшеничной муки, которая содержит только эндосперм зерен пшеницы. Цельнозерновая ржаная мука обогащает хлеб с точки зрения пищевой ценности и пользы для здоровья, в то время как очищенная пшеничная мука имеет более высокую энергетическую ценность и улучшает пористую текстуру хлеба [8, 9].

Хлебобулочные изделия, которые изготавливаются из смеси ржаной и пшеничной муки, имеют кислотность в пределах 7-11 градусов, влажность составляет 45-50%, а пористость варьируется от 46% до 60%.

Все ржано-пшеничные хлебобулочные изделия нуждаются в подкислении с помощью натуральных или инактивированных заквасок [10].

Использование заквасок положительно сказывается на качестве хлеба. Хлебобулочные изделия, выработанные с использованием заквасок, могут применяться в лечебном рационе больных глютеновой энтеропатией [11].

Сегодня наиболее популярны следующие сорта ржано-пшеничного хлеба: «Дарницкий», «Бородинский». По составу они отличается друг от друга минимально, однако каждый сорт имеет свои особенности.

Тыква в ассортименте хлебопекарной продукции.

Тыква (*Cucurbita sp. L.*) – широко культивируемая овощная культура, известная универсальностью и пищевой ценностью своих плодов, широко используется во всём мире.

Тыква, принадлежащая к семейству тыквенных, является одним из широко культивируемых и потребляемых овощей, мировое производство в 2022 году составило около 23 миллионов тонн [12].

Тыква содержит волокна, белки, минералы, стерины, полифенолы (например, фенольные кислоты), флаваноны и ксантофиллы входят в число многих биоактивных соединений, источником которых, как известно, является тыква, помимо других биоактивных соединений, токоферолы, каротины, зеаксантин и лютеин. Кроме того, в ней содержится большое количество жирных кислот, таких как линолевая, пальмитиновая, стеариновая и олеиновая кислоты

Мякоть содержит биоактивные вещества, которые обладают терапевтическими действиями, такими как антибактериальные, противодиабетические, противовирусные, антипестицидные, противогрибковые, противораковые (лечение рака груди), противоглистные, противовоспалительные (лечение артрита), антигипертензивные, антигиполипидемические, предотвращают дефицит железа, гиперплазию предстательной железы, улучшают мужскую фертильность, обладают иммуномодулирующей активностью, антигипертензивными, противомеланомными, кардиозащитными, антиоксидантными и ингибиторами липоксигеназы, противоязвенными, ранозаживляющими

Три вида тыкв, а именно *Cucurbita moschata*, *Cucurbita maxima* и *Cucurbita pepo*, наиболее часто выращиваются в мире.

Богатый комплекс БАВ к ним относятся витамины *A, C, E,* группы *B*, а также редкие витамины *K* и *T*. Из минералов в тыкве присутствуют калий, магний, железо, цинк, фосфор, кальций, фтор и другие, содержащийся в тыкве, объясняет перспективы ее использования в лечебном деле и создание на ее основе функциональных продуктов питания [13].

Поэтому тыква была разработана и переработана в различные пищевые продукты, такие как закуски, супы, выпечка и напитки.

Основной витаминный состав мякоти предствлен в таблице 1 (составлено автором).

Хлебобулочные изделия, созданные на основе тыквы, отличаются ярко выраженными антиоксидантными свойствами. Присутствующие в тыкве антиоксиданты, такие как бета-каротин и витамины поддерживают общее здоровье человека [14].

Основная часть тыквы представлена мякотью. Мякоть свежей тыквы является источником важ-

ных для человека питательных веществ [15].

Таблица 1 – Витаминный состав мякоти тыквы

Название витамина	Содержание в 100 г, мг
Тиамин, B_1	0,03-0,06
Рибофлавин, B_2	0,04-0,07
Никотиновая кислота, РР	0,36-0,56
Аскорбиновая кислота, С	11,0-51,0
Пантотеновая кислота, B_3	0,22-0,42
Пиридоксин, B_6	0,13-0,15
Фолиевая кислота, B_9	0,004-0,019

Тыква широко используется в разных отраслях пищевой промышленности как функциональный ингредиент, включая производство напитков, молочных продуктов и хлебобулочных изделий. Интересно, что тыквенная мука способна усиливать клейковинную структуру в тесте и улучшать качества, а также текстуру кондитерских изделий. Мякоть тыквы, как было отмечено, изобилует биоактивными метаболитами, среди которых особое внимание привлекают каротиноиды. Они отвечают за выраженные изменения цвета от красного к оранжево-желтому, что зависит от конкретного сорта [16].

Кроме того, мякоть тыквы содержит интересные (поли)фенольные соединения, которые являются более полярными биоактивными веществами, но их изученность значительно отстает от изучения терпеноидов. Как качественный, так и количественный состав фенольных соединений, присутствующих в мякоти, включая фенольные кислоты, лигнаны и флавоноиды, варьируется в зависимости от ряда факторов, таких как степень спелости плодов и их условия окружающей среды.

Для мякоти свежей тыквы характерны антиульцерогенные и гастропротективные свойства, предотвращает негативные воздействия аспирина на слизистую желудка человека. Для обогащения хлебобулочных изделий активными веществами применяют тыквенное пюре. Добавление такого пюре вызывает лишь незначительное снижение кислотности хлеба и благоприятно сказывается на сроке хранения готового продукта, продлевая его, и увеличивает вязкость теста [17].

Хлеб – неотъемлемая часть в рационе человека. Улучшение уже имеющихся и придание новых свойств этому традиционному продукту актуальная задача пищевой промышленности [18]. Использование порошка тыквы в качестве дополнительного сырья позволит получить богатый витаминами и минералами готовый продукт с увеличенным сроком хранения [19]. Хлеб можно считать одним из самых древних пищевых продуктов в истории человечества, который занимает важное место в нашем рационе. Он богат сложными углеводами, клетчаткой, растительными белками, витаминами группы *B* и минералами, при этом содержит минимальное количество жиров [20].

Методология. Цель исследования – создать технологический процесс производства ржано-пшеничных хлебобулочных изделий с использованием ржаной закваски и добавлением тыквенного порошка в рецептуру.

Задачи исследования:

– проанализировать существующие методы производства тыквенного порошка и выбрать наиболее оптимальный из них;

– провести исследования влияния тыквенного порошка на органолептические, физико-химические показатели готовых хлебобулочных изделий на ржаных закваcках.

В ходе исследования использовались: пшеничная мука первого сорта по (ГОСТ 26574 – 2017 Мука пшеничная хлебопекарная. Технические условия), ржаная обдирная мука (ГОСТ 7045 – 2017 Мука ржаная хлебопекарная. Технические условия), ржаная закваска, поваренная соль высшего сорта (по ГОСТ Р 51574-2000 Соль поваренная пищевая Технические условия), хлебопекарные прессованные дрожжи (по ГОСТ 171 2015 Дрожжи хлебопекарные прессованные. Технические условия), подсолнечное масло (по ГОСТ 1129-2013 Масло подсолнечное. Технические условия), питьевая вода (СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества).

А также следующие ингредиенты – тыква сорта «Витаминная».

В ходе исследования были определены органолептические показатели согласно ГОСТ 31807-2012 Изделия хлебобулочные из ржаной и смеси ржаной и пшеничной муки, а также применены физико-химические. методы, влажность хлебобулочных изделий определяли согласно ГОСТ 21094, гравиметрическим методом, путем высушивания пробы в сушильном шкафу, кислотности определяли по ГОСТ 5670-96 титриметрическим методом, который основан на нейтрализации кислот в изделии раствором щелочи и последующем определении объема этой щелочи, пористость определяли согласно ГОСТ 5669.

Результаты. Перед использованием тыква предварительно очищалась, мякоть измельчалась на кусочки. Полученная мякоть тыквы помещалась в сушильный шкаф. В течение 3 ч. проводилось высушивание мякоти тыквы при температуре 70°С до влажности 10-14%. По завершении смесь измельчалась на электромельнице, полученный порошок помещался в герметичную упаковку для хранения. Данный метод менее трудо- и энергозатратный. Также он позволяет сохранить в полной мере макро- и микроэлементы тыквы, которые могут быть утеряны вследствие варки продукта.

Выбор дозирования порошка из тыквы. Оптимальное соотношение муки и порошка тыквы определяли при помощи сравнения качества производимых из смеси ржаной и пшеничной муки с

характеристиками, соответствующими качеству хлеба, выпекаемого по традиционной технологии (табл. 2).

Для приготовления теста применялась закваска, а тыквенный порошок добавлялся без предварительной обработки. Процесс изготовления теста предусматривал механическое смешивание строго определённых пропорций пшеничной и ржаной муки с закваской, после чего в смесь вводились точно отмеренные количество соли и дрожжей и воды.

В тесто вводили тыквенный порошок в различных пропорциях:

– образец 1 контроль (без добавления порошка тыквы);

– образец 2 с 1% содержанием порошка тыквы;

– образец 3 с 3% содержанием порошка тыквы;

– образец 4 с 5% содержанием порошка тыквы;

– образец 5 с 7% содержанием порошка тыквы;

– образец 6 с 10% содержанием порошка тыквы.

Для замешивания использовалась вода с температурой 30°*C*.

Суспензию из прессованных хлебопекарных дрожжей готовили в соотношении 1:4 с водой, а соль добавляли в виде водного раствора. Замес теста проводился в течение 5 минут. Затем тесто оставляли бродить в течение 2 часов при температуре 35°*C*, а через 60 минут производили обминку.

Приготовленные тестовые заготовки помещались в формы для расстойки, которая длилась 60 минут при температуре 35°*C*. Выпечка хлебобулочных изделий осуществлялась в течение 20 минут при температуре 220°*C*.

Таблица 2 – Рецептура ржано-пшеничного хлеба без добавок

Ингредиент	Количество / гр.
Мука пшеничная	134
Мука ржаная обдирная	64
Соль	4
Дрожжи	1,5
Вода, мл	150
Закваска	40

Результаты физико-химических показателей ржано-пшеничного хлеба с добавлением тыквенного порошка представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты физико-химических показателей ржано-пшеничного хлеба с добавлением тыквенного порошка

Показатели	Контроль (без добавок)	1 % порошка тыквы	3 % порошка тыквы	5 % порошка тыквы	7 % порошка тыквы	10 % порошка тыквы
Пористость мякиша %	72,9	66	69,7	71,2	74,7	70,7
Влажность мякиша %	43,8	43,8	44,9	45,4	45,6	45,8
Кислотность мякина, С	4,4	3,8	3,8	3,8	3.8	3,8

Из таблицы 3 видно, что добавление порошка из тыквы влияет на физико-химические свойства ржано-пшеничного хлеба. При добавлении 1% порошка тыквы пористость хлеба снижается до 66% по сравнению с контролем, в котором пористость составляет 72,9%, однако с увеличением его доли она постепенно возрастает. Так при введении 3% порошка, пористость составляет 69,7%, при введении 5% порошка, пористость составляет 71,2%. Наилучшие результаты показал образец с добавлением 7% порошка тыквы, пористость составила 74,7%. А при введении 10% порошка пористость хлеба значительно уменьшается и составляет 70,7%. Кроме того, влажность мякиша ржано-пшеничного хлеба растет с увеличением доли тыквенного порошка. Это вызвано тем, что в высушенном состоянии тыква еще содержит некоторое количество влаги. Кислотность хлеба при добавлении тыквенного порошка уменьшилась незначительно во всех опытных образцах и далее оставалась постоянной.

Все результаты анализов, органолептических, физико-химических показателей хлеба удовлетворяли требованиям ГОСТ 31807-2012 Изделия хлебобулочные из ржаной и смеси ржаной и пшеничной муки. Общие технические условия.

Обсуждение. Анализ химического состава тыквенного порошка раскрывает его нутриентный потенциал: 4,48% золы (в пересчете на сухое вещество), это натуральное вещество, богатое минералами, включающее кальций, фосфор, калий, железо и магний. Содержание клетчатки 9,01% (в пересчете на сухое вещество). Добавление порошка привело к ощутимому приросту содержания клетчатки (на 0,68%) и золы (на 0,27%), по сравнению с контрольной группой.

Содержание клетчатки и золы, может быть полезным для общего здоровья и профилактики различных заболеваний.

Изучение аминокислотного профиля белков тыквенного порошка выявило его преимущество перед пшеничной и ржаной мукой в отношении содержания незаменимых аминокислот. Концентрация лизина, валина и треонина превосходила показатели базового сырья в 2,1, 1,9 и 1,6 раза соответственно. Это привело к увеличению суммарного содержания незаменимых аминокислот в опытном хлебе на 10% по сравнению с контрольным, что напрямую указывает на повышение его биологической ценности.

Также было исследовано влияние тыквенного порошка на органолептические характеристики готовых изделий, изготовленных согласно указанной ранее технологии.

Исследование органолептических характеристик образцов хлеба с добавлением тыквенного порошка, представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Исследование органолептических характеристик образцов хлеба с добавлением тыквенного порошка

Наименование показателя	Образец 1 Контроль (без добавок)	Образец 2 с 1% порошка тыквы	Образец 3 с 3% порошка тыквы	Образец 4 с 5% порошка тыквы	Образец 5 с 7% порошка тыквы	Образец 6 с 10% порошка тыквы
Внешний вид: форма и поверхность	Соответствующие виду изделия	Соответствующие виду изделия	Соответствующие виду изделия	Соответствующие виду изделия	Соответствующие виду изделия	корка была сильно запеченной, появились трещины и надрывы
Цвет	От светло-коричневого до темно-коричневого	темно-коричневой	темно-коричневой	темно-коричневой	темно-коричневой	темно-коричневой
Состояние мякиша (пропеченность, пористость)	Пропеченный, с равномерной пористостью	Пропеченный, с равномерной пористостью	Пропеченный, с равномерной пористостью	Пропеченный, с равномерной пористостью	Пропеченный, с равномерной пористостью	Не пропекся, с равномерной пористостью
Вкус	Без постороннего привкуса.	Привкус, свойственный внесенной добавке	Привкус, свойственный внесенной добавке	Привкус, свойственный внесенной добавке	Привкус, свойственный внесенной добавке	Привкус, свойственный внесенной добавке
Запах	Без постороннего запаха.	Запах, свойственный внесенной добавке	Запах, свойственный внесенной добавке	Запах, свойственный внесенной добавке	Запах, свойственный внесенной добавке	Запах, свойственный внесенной добавке

Было проанализировано 5 опытных образцов хлеба с различными массовыми долями тыквенного порошка. При увеличении массовой доли порошка до 10% на хлебе появлялись трещины и надрывы. Опытные образцы № 2, № 3, № 4, № 5, отличались темно-коричневой коркой, равномерной пористостью, мякиш этих образцов не отличался от контроля по всем показателям. У образца № 6 корка была сильно запеченной, а мякиш не пропекся.

Выводы. Эффективный способ улучшения витаминной обеспеченности – включение в рацион человека изделий с добавлением нетрадиционного сырья, содержащего необходимые витамины и микроэлементы.

В результате исследования был проведен анализ существующих методов производства тыквенного порошка и выбран наиболее оптимальный из них. Исследовано влияние тыквенного порошка на органолептические, физико-химические показатели готовых хлебобулочных изделий на ржаных закваскаx. Все результаты анализов, органолептических, физико-химических показателей хлеба удовлетворяли требованиям ГОСТ 31807-2012 Изделия хлебобулочные из ржаной и смеси ржаной и пшеничной муки. Общие технические условия.

Исследования показывают, что хлеб, приготовленный из ржаной и пшеничной муки с добавлением 7% тыквенного порошка, является отличным вариантом для тех, кто стремится к сбалансированному и здоровому питанию. Включение тыквенного порошка не оказало негативного воздействия на органолептические и физико-химические свойства конечного продукта, что демонстрирует его потенциальную пользу в рационе. Тыквенный порошок, благоприятно влияет на вкус и аромат конечного продукта.

Добавление порошка привело к ощутимому приросту содержания клетчатки (на 0,68%) и золы (на 0,27%), по сравнению с контрольной группой.

Внесение тыквенного порошка в рецептуру изготовления ржано-пшеничных хлебобулочных изделий на ржаных закваскаx привело к увеличению суммарного содержания незаменимых аминокислот в опытном хлебе на 10% по сравнению с контрольным, что напрямую указывает на повышение его биологической ценности.

Наши данные подтверждают, что тыквенный порошок служит ценным источником макро- и микроэлементов, а также азотистых соединений, благотворно влияющих на питание дрожжевых клеток и процессы тестообразования, в частности, брожение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. P. Sharma, G. Kaur, B.A. Kehinde, N. Chhikara, A. Panghal, H. Kaur Pharmacological and biomedical uses of extracts of pumpkin and its relatives and applications in the food industry: A review In International Journal of Vegetable Science, 26 (1) (2020), pp. 79-95.

2. Ролдугина Д.С., Добрынина Я.С. Потребительские предпочтения в сегменте функционального хлеба // Индустрия питания. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 55-62.

3. Арефьева А.С., Балабанов Ю.О. Перспективы использования овощных порошков в хлебопекарной промышленности // Индустрия питания. – 2023. – Т. 8, № 2. – С. 33-40.

4. Wahyono A., Budiati T., Shahbaz H. M. Feasibility of Using Yellow Pumpkin (Cucurbita moschata) in Developing Bakery Products. – 2023.

5. L. Han, J. Zhang, H. Cao Effects of orange peel powder on rheological properties of wheat dough and bread aging Food Sci. Nutr., 9 (2021), pp. 1061-1069.

6. Лабутина Наталья Васильевна, Герасимова Элла Олеговна, Рогозкин Евгений Николаевич, Шаймерденова Даригаш Арыновна, Юрченко Татьяна Игоревна Исследование влияния процесса прогрева ржано-пшеничного формового хлеба из замороженных полуфабрикатов высокой степени готовности на физико-химические показатели // Health, Food & Biotechnology. 2019. – №4.

7. Kaur P. et al. Rye: A wonder crop with industrially important macromolecules and health benefits //Food Research International. – 2021. – Т. 150. – С. 110769.

8. Elena Bartkiene, Vadims Bartkevics, Iveta Pugajeva, Vita Krungleviciute, Sigrid Mayrhofer, Konrad Domig, The contribution of P. acidilactici, L. plantarum, and L. curvatus starters and L-(+)-lactic acid to the acrylamide content and quality parameters of mixed rye - Wheat bread, LWT, Volume 80, 2017.

9. Иванова Н.Н., Филимонова О.С. Функциональные хлебобулочные изделия: современные подходы к разработке // Индустрия питания. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 62-69.

10. Munch-Andersen C.B. et al. The impact of fermentation length and dough composition on the stability of liquid sourdough starters //International Journal of Food Microbiology. – 2025. – Т. 426. – С. 110932.

11. Islam M. A., Islam S. Sourdough bread quality: Facts and Factors // Foods. – 2024. – Т. 13. – №. 13. – С. 2132.

12. X. Gao, Z. Yang, L. Huang, S. Zuo, X. Li, J. Li, W. Jiang, S. Wang, Y. Zhang Protective effects of pumpkin polysaccharide hydrolysates on oxidative stress injury and its potential mechanism – antioxidant mechanism of pumpkin polysaccharide hydrolysates Int. J. Biol. Macromol., 241 (2023), Article 124423.

13. B. Kulczyński, A. Sidor, A. Gramza-Michałowska Antioxidant potential of phytochemicals in pumpkin varieties belonging to Cucurbita moschata and Cucurbita pepo species CyTA J. Food, 18 (1) (2020), pp. 472-484.

14. Татьяна Елисеева, Алексей Ямпольский Тыква (лат. Cucurbita) // Журнал здорового питания и диетологии. – 2018. – №6.

15. Иванова, Н.Н. Разработка технологии приготовления пшеничного хлеба с добавлением семян тыквы / Н.Н. Иванова, Д.И. Иванов, О.С. Филимонова // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 61-3. – С. 72-75. – DOI 10.18411/lj-05-2020-55. – EDN UGSEZX.

16. M. Hosen, M.Y. Rafii, N. Mazlan, M. Jusoh, Y. Oladosu, M.F.N. Chowdhury, I. Muhammad, M.M.H. Khan Pumpkin (Cucurbita spp.): a crop to mitigate food and nutritional challenges Horticulturae, 7 (10) (2021), p. 352.

17. N.J. Temple Antioxidants and disease: more questions than answers Nutrition Research, 20 (2000), pp. 449-459.

18. Ролдугина, Д.С. Обзор покупательских предпочтений на рынке хлебобулочных изделий / Д.С. Ролдугина, Я.С. Добрынина // Научно-аналитический экономический журнал. – 2018. – № 7(30). – С. 5. – EDN XTAFHV.

19. Арефьева, А.С. Научное обоснование применения тыквы в технологии хлебопечения / А.С. Арефьева, Ю.О. Балабанов // Пищевые технологии и биотехнологии: XVIII Всероссийская конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, Казань, 18-21 апреля 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 764-770. – EDN ISILDK.

20. Weegels P.L. The future of bread in view of its contribution to nutrient intake as a starchy staple food //Plant Foods for Human Nutrition. – 2019. – Т. 74. – №. 1. – С. 1-9.

Статья поступила в редакцию 21.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 664.143, 635.64
EDN: FOBEXJ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧЕРНОПЛОДНОЙ РЯБИНЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОМАДНОЙ НАЧИНКИ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 7663-1784
Author ID: 450578
ORCID: 0000-0002-4777-1465
Scopus ID: 57203766629

ТИМАКОВА Роза Темерьяновна, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры биотехнологии и инжиниринга
Уральский государственный экономический университет
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной воли, 62/45, e–mail:trt64@mail.ru)
ORCID: 0009-0008-1480-0603

НЕУСТРОЕВ Антон Павлович, аспирант
Уральский государственный экономический университет
(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной воли, 62/45, e–mail: anton_neustroev@bk.ru)

Аннотация. Использование черноплодной рябины (аронии), богатой комплексом биоактивных соединений, в начинках помадных конфет позволяет повысить биологическую ценность сахаристых кондитерских изделий. Экспериментальным путем обоснована технология получения помадной начинки с использованием выжимок ягод черноплодной рябины. Установлены оптимальные дозировки выжимок черноплодной рябины в количестве 5-15% в рецептуру помадной начинки. При этом опытный образец № 2 отличается лучшими потребительскими характеристиками по всем органолептическим показателям. При исследовании органолептических показателей руководствовались ГОСТ 4570-2014. Определена дозировка сахара и/или сахарной пудры в помадную начинку, влияющая на консистенцию. В опытном образце № 1 наблюдается мягкая пастообразная консистенция в результате введения меньшего количества выжимок 5% по сравнению с опытными образцами № 2,3 и большего количества молока сгущенного. В опытном образце № 3 произошло полное растворение сахара - песка, но наблюдается частичное образование кристаллов в массе за счет введения большого количества выжимок – 15%. Для улучшения растворимости, недопущения появления сахарных комочков в сахаро-водном растворе при растворении сахарной пудры в воде и формирования нежной консистенции помадной начинки предложена замена сахара-песка на пудру. Обосновано введение компонента выжимок черноплодной рябины, обладающего функциональными свойствами для организма человека. В результате добавления выжимок полученные опытные образцы № 1, 2 могут разрабатываться как функциональные продукты в качестве начинки для конфет и в качестве готового продукта – пасты. Полученные результаты позволили показать ценность технологического решения при разработке помадной начинки с добавлением выжимок черноплодной рябины. Требуется продолжение исследований по химическому составу помадной начинки с добавлением выжимок черноплодной рябины.

Ключевые слова: выжимки, черноплодная рябина, арония, помадная начинка.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION OF FUNCTIONAL-PURPOSE POMADE FILLING

© The Author(s) 2025
TIMAKOVA Roza Temer'janovna, doctor of technical sciences, docent,
professor of Department of Biotechnology and Engineering
Ural State University of Economics
(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail:trt64@mail.ru)

NEUSTROEV Anton Pavlovich, PhD student
Ural State University of Economics
(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: anton_neustroev@bk.ru)

Abstract. The use of mountain ash (aronia), rich in a complex of bioactive compounds, in the fillings of fondant candies makes it possible to increase the biological value of sugary confectionery products.The technology of obtaining a fondant filling using extracts of mountain ash berries has been experimentally substantiated. Optimal dosages of prune rowan pomace in the amount of 5-15% in the formulation of the fondant filling have been established. At the same time, prototype No. 2 has the best consumer characteristics in all organoleptic parameters. In the study of organoleptic parameters, GOST 4570-2014 was used. The dosage of sugar and/or powdered sugar in the fondant filling has been determined, affecting the consistency. In prototype No. 1, a soft paste-like consistency is observed as a result of the introduction of a smaller amount of pomace of 5% compared to the prototype samples No. 2,3 and a larger amount of condensed milk. In prototype No. 3, granulated sugar completely dissolved, but partial formation of crystals in the mass was observed due to the introduction of a large amount of pomace – 15%. To improve solubility, to prevent the appearance of sugar lumps in a sugar-water solution when powdered sugar is dissolved in water and to form a delicate consistency of the fondant filling,

it is proposed to replace granulated sugar with powdered sugar. The introduction of the extract component of mountain ash, which has functional properties for the human body, is justified. As a result of the addition of pomace, the obtained prototypes No. 1, 2 can be developed as functional products as a filling for sweets and as a finished product – pasta. The results obtained made it possible to show the value of a technological solution in the development of a fondant filling with the addition of mountain ash pomace. Further research is required on the chemical composition of the fondant filling with the addition of black mountain ash pomace.

Keywords: pomace, mountain ash, aronia, fondant filling.

Для цитирования: *Тимакова Р.Т. Использование черноплодной рябины в технологии получения помадной начинки / Р.Т. Тимакова, А.П. Неустроев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 117-122. – EDN: FOBEXJ.*

Введение. Одним из трендов современного потребительского рынка является предложение продукции массового потребления, обогащенной плодово-ягодным сырьем, источником водорастворимых витаминов, органических кислот, дубильных веществ, флавоноидов и минеральных веществ [1].

Черноплодная арония (*Aroniamelanocarpa*), относящаяся к семейству Розовые, наиболее распространена в Северной Америке. Помимо *Aroniamelanocarpa*, известны *Aroniaarbutifolia* (красная арония) и гибрид чёрной и красной аронии – пурпурная арония (*Aroniaprunifolia*). В начале XX века арония впервые появляется в Северной, Восточной и Центральной Европе.

Плоды черноплодной рябины содержат многочисленные соединения, среди которых органические кислоты, углеводы, аминокислоты, минералы, полифенолы, витамины и ароматические соединения [2]. Ягоды рябины ценны содержанием марганца, фтора, железа, бора и меди.

Пищевые волокна – незаменимые соединения, содержание которых в плодах черноплодной рябины составляет от 5,6 г/100 г, в жмыхе – от 21,79 до 77,9%.

Согласно исследованиям выжимки, полученные из плодов черноплодной аронии, содержат жир, в состав которого входят токоферолы, стерины и фосфолипиды. Среднее количество полифенольных соединений составляет от 31-63 грамм на 1 кг выжимок [3].

Исследования по содержанию белка в плодах черноплодной рябины показали низкое содержание – до 1,5 г на 100 грамм.

Плоды черноплодной рябины имеют в своем составе примерно 10 % сахаров, включительно глюкозу, фруктозу, сахарозу, органических кислот содержится до 1,3 %, из которых преобладает яблочная кислота. Кроме того, в ягодах рябины найдены в незначительных количествах пектиновые вещества (примерно 1%) и дубильные вещества в пределах 0,5-0,6% [4].

Пектин, содержащийся в ягодах, выводит из организма тяжёлые металлы и опасные радиоактивные вещества. Рябина положительно влияет на пищеварение и аппетит. Ягоды помогают при заболеваниях печени и почек. Плоды часто используют для лечения пациентов с диабетом, различными аллергическими заболеваниями и болезнями щитовидной железы.

Антиоксидантный потенциал в плодах черноплодной рябины представлен антоцианами, проантоцианидинами, флаван-3-олами и флавоногликозидами [5]. Плоды черноплодной рябины обладают мощной антиоксидантной активностью, способную бороться с различными видами рака, в том числе молочной железы, рак кишечника и лейкемия [6].

Арония может оказывать положительное влияние при дислипидемии и гипертонии, усиливая антиоксидантные защитные механизмы организма. Противовоспалительный эффект, в свою очередь, может привести к снижению риска метаболических нарушений при более длительном использовании [7].

По содержанию минералов черноплодная рябина может быть полезна для восполнения дефицита калия и цинка в рационе. Среди витаминов плоды аронии содержат витамины B_1, B_2, B_6 и *C*, пантотеновую кислоту и ниацин [8]. Наличие витаминов, особенно витамина *C*, в совокупности с другими компонентами способствуют укреплению иммунной системы [9].

Полифенолы черноплодной рябины значительно снижают содержание липидов в крови, ингибируя всасывание холестерина в тонком кишечнике и ослабляя адипогенез. Это, в свою очередь, делает добавки из черноплодной рябины эффективными в борьбе с гиперлипидемией и ожирением, а также, как следствие, с развитием цереброваскулярных и сердечно-сосудистых заболеваний [10].

Черноплодная рябина богата фитохимическими веществами, такими как антоцианы и фенольные кислоты, которые подавляют рост опухолевых клеток, вызывают запрограммированную клеточную смерть (апоптоз) и уменьшают вредное воспаление в организме. Эти антиоксидантные фитохимические вещества действуют профилактически и восстанавливающе, делая черноплодную рябину источником питательных веществ.

Известно, что при употреблении плодов черноплодной рябины снижаются уровень холестерина и артериальное давлениеза счет содержащихся полифенолов и неполифенолов, увеличивается прочность и эластичность сосудов [11]. При этом нормализуется кровяное давление, укрепляются кровеносные сосуды, повышается их эластичность. Большинство антоцианов в черноплодной рябине

– это цианидины, которые существуют в форме, связывающей различные молекулы сахара (включая галактозу, арабинозу, глюкозу и ксилозу) [11, 12].

Черноплодная рябина издавна используется для борьбы с окислительным стрессом, связанным со старением и болезнями, улучшения работы печени, поддержки пищеварения и улучшения здоровья дыхательных путей.

Биоактивные соединения объясняют биологические эффекты, связанные с плодами аронии, и указывают на потенциал для выявления ценных терапевтических агентов. Черноплодная рябина обладает многочисленными преимуществами для здоровья, включая противовоспалительные, противораковые, антидиабетические и антиатеросклеротические свойства [13-15].

Экстракт черноплодной рябины достоверно ингибирует развитие метастазов и повышает противометастатическую активность циклофосфана в комбинированном лечении и представляет интерес в качестве средства для повышения эффективности химиотерапии опухолей [16].

В настоящее время продукция из черноплодной рябины доступна на российском рынке, в основном включает свежие ягоды, соки, джемы и желе.

Всё больше внимания уделяется использованию побочных продуктов переработки фруктов, таких как выжимки, которые представляют собой дешёвое и доступное сырьё для дальнейшей переработки.

Кроме того, концентрация соединений, отвечающих за терпкий вкус черноплодной рябины, снижается в процессе обработки, поэтому она становится более приятной на вкус.

Известная технология производства желейных конфет с экстрактом и порошком аронии применяется в производстве с целью замены синтетических красителей. Исследования показали, что экстракт черноплодной рябины может использоваться в качестве замены кармуазинового красителя в желейных конфетах. Массовая доля сухого вещества, массовая доля редуцирующих веществ повышены вжеле содержащем экстракт черноплодной рябины по сравнению с образцом содержащим кармуазин. Снижение массовой доли сухого вещества объясняется введением в рецептуру желейных конфет желатина и сорбита, обладающими способностью связывать воду [17].

Установлено, что добавка из черноплодной рябины повышает пищевую ценность песочного теста и улучшает его качество. Физиологически активные соединения черноплодной рябины оказывают свое влияние на качество клейковины пшеничной муки [18].

Порошок из жмыха черноплодной рябины используется для разработки сбалансированной рецептуры хлебобулочных изделий из пшеничной муки [19].

Сахара являются основными углеводами в черноплодной рябине, при этом общее содержание сахаров составляет от 68 до 158 г/кг сухой массы [20].

Состав сахаридов в жмыхе может отражать интенсивность процесса производства сока, который часто связан с ферментативными процессами, а также с дополнительной стадией экстракции жмыха после первого отжима. Общее содержание сахара в жмыхе составило 84 г/кг [21].

В качестве источника гемового железа в кондитерские изделия может вводиться альбумин черный пищевой ввиде высушенной крови крупного рогатого скот, который служит основным источником гемоглобина [22].

Наличие в крови убойных животных значительного количества железа предопределяет ее применение для выработки продуктов питания, способствующих профилактике и лечению железодефицитных анемических заболеваний [23].

Цель исследования заключается в разработке помадной начинки с использованием выжимок черноплодной рябины.

Методология. Исследование направлено на выявление технологических особенностей использования выжимок черноплодной рябины при производстве помадной начинки. Вводимые компоненты в рецептуру: готовый альбумин черный пищевой (производитель Нидерланды) и выжимки черноплодной рябины. Подготовка выжимок черноплодной рябины включает следующие операции: предварительно помытые плоды черноплодной рябины измельчают на мельнице до получения измельченной массы, полученную массу центрифугируют на центрифуге ПН-8 до отделения сока и выжимок.

По результатам проведенных исследований оценивались органолептические характеристики образцов контрольной и опытных групп № 1, 2, 3 по ГОСТ 4570-2014 «Конфеты. Общие технические условия». Сладость полученной помадной начинки оценивали по вкусовым рецепторам.

Результаты. Разработана рецептура помадной начинки с добавлением выжимок черноплодной рябины. Традиционная технология включает в себя подготовку ингредиентов, создание сахарно-паточного раствора, изготовление помадного сиропа и охлаждение, сбивание конфетной помадной начинки, формовка и глазирование, заворачивание и упаковка.

В опытных образцах групп № 1 и 2 молоко сгущенное заменялось на выжимки черноплодной рябины в соотношении 5% и 10%, в опытном образце № 3 заменялось молоко сгущенное на выжимки черноплодной рябины в соотношении 15% от массы молока сгущенного и одновременно уменьшалось количество сахарной пудры.Альбумин черный пищевой введен в рецептуру в одинаковом количестве для всех образцов – 2 мл. Добавление альбумина черного пищевого дополнительно связано с профилактикой железодефицитной анемии.

Машинно-аппаратная схема производства

помадной начинки с добавлением выжимок черноплодной рябины и альбумина черного пищевого представлена на рисунке 1.

Технологический процесс получения помадной начинки согласно машинно-аппаратной схемы состоял из следующих этапов: подготовка ингредиентов, изготовление помадного сиропа и охлаждение, сбивание конфетной помадной начинки.

В смесителе SMG-50 для приготовления помадного сиропа сначала смешивают белый сахар с водой, объем которой составляет 25% от веса сахара-песка. Для равномерного распределения в водно-сахарном сиропе белого сахара проводилось его измельчение до сахарной пудры. Далее в смесь вводят пар под давлением 5-6 атмосфер для улучшения растворения сахара. Сироп варится в течение 15-20 минут, поддерживая температуру в пределах +(107-108)ºС, и постоянно перемешивается до тех пор, пока сахар полностью не растворится в воде. В завершении процесса полученный сироп фильтруют через сито и направляют в специальный аппарат.

Водно-сахарный сироп в объёме 18-22% подвергается перекачиванию при помощи темперирующей машины ТМ 50. В процессе работы машины к смеси добавляется патока. Затем, в течение 10-12 минут, под давлением пара 5-6 атмосфер происходит выпаривание избыточной воды. После завершения этого процесса, готовая масса перегоняется плунжерным насосом в варочную колонку типа 33А, где её температура достигает 115-118ºС. Далее сахаро-паточная смесь отправляется в помадосбивальную машину. В этой машине смесь не только подогревается, но и тщательно вымешивается в течение 16-20 минут, обеспечивая её однородность и консистенцию.

В соответствии с рецептурой вводятся выжимки черноплодной рябины и альбумин черный пищевой, растворенный предварительно в воде. Полученную помадную начинку направляют в темперирующую машину МТ-250.

Образцы контрольной и опытных групп № 1, 2, 3 представлены на рисунке 2.

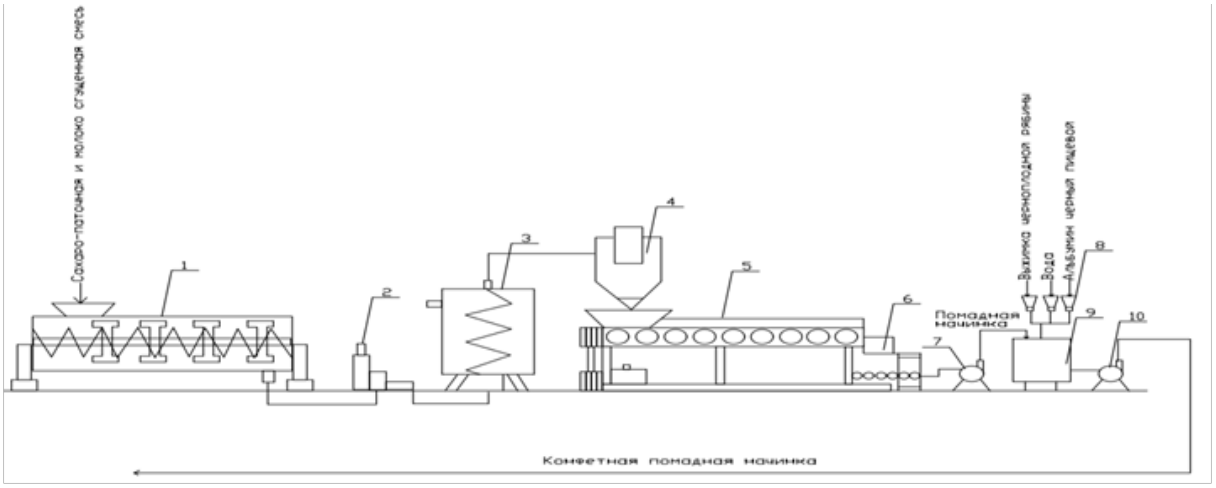
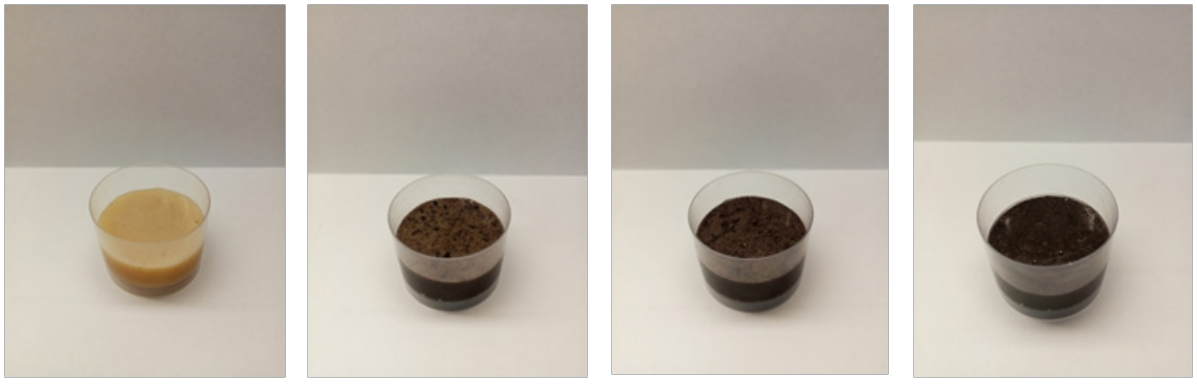


Рисунок 1 – Машинно-аппаратная схема получения помадной начинки с добавлением выжимок черноплодной рябины: 1 – смеситель непрерывного действия, 2 – насос дозатор, 3 – змеевиковый ваккум-аппарат, 4 – пароотделитель, 5 – помадосбивальная машина, 6 – промежуточная емкость, 7 – насос, 8 – дозатор, 9 – темперирующая машина, 10 – дозатор



1 *2* *3* *4*

Рисунок 2 – Контрольный и опытные образцы помадной начинки с добавлением и без выжимок черноплодной рябины: 1 – контрольный образец, 2 – опытный образец с добавлением выжимок черноплодной рябины 5%, 3 – опытный образец с добавлением выжимок черноплодной рябиной 10%, 4 – опытный образец с добавлением выжимок черноплодной рябиной 15%

Обсуждение. Была проведена органолептическая оценка образцов контрольной и опытных групп, результаты которой представлены в таблице 1.

По результатам органолептической оценки установлено, что в опытном образце № 1 присутствует ярко выраженный вкус альбумина черного пищевого по сравнению с образцом № 2, в котором отмечается слабовыраженный вкус альбумина черного пищевого,обусловленный повышением содержания вносимых выжимок черноплодной рябины, перебивающим вкус альбумина. За счет увеличения содержания выжимок черноплодной рябины в опытном образце № 3 с дозировкой 15% присутствует ярко выраженный вкус вносимого компонента по сравнению с контрольным образцом.

Запах свойственные основному составу, в образцах опытных групп № 2 и 3 проявляется более интенсивный запах черноплодной рябины.

При оценке сладости в опытном образце № 1 ощущается более сладкий вкус по сравнению с опытными образцами групп № 2 и 3. В опытных образцах № 2 и 3 сладость ощущается вкусовыми рецепторами человека слабее.

В контрольном образце консистенция помадной начинки тягучая. В опытных образцах групп № 1 и 2 отмечается загустение за счет увеличения содержания выжимок до мягкой пасотообразной в образце № 1 и пастообразной в образце 2. В опытном образце № 3 консистенция становится плотной засахаренной по сравнению с опытными образцами групп № 1, 2, что связано с увеличением количества вносимых выжимок черноплодной рябины до 15%, при этом по всей массе происходит процесс выделения кристаллов сахара при остывании начинки до комнатной температуры.

Во всех образцах установлена сухая нелипкая поверхность. Интенсивность цвета определяется количеством вносимых выжимок.

Таблица 1 – Оценка органолептических показателей контрольного и опытных образцов

Наименование показателей	Показатели согласно ГОСТ 4570-2014	Контрольный образец	Опытные образцы		
			№ 1	№ 2	№ 3
Вкус и запах	Свойственны основному составу компонентов конфет с ясно выраженным вкусом и запахом	Выраженный вкус альбумина, запах свойственны основному составу компонентов	Ярко выраженный вкус альбумина, запах свойственны основному составу компонентов	Слабовыраженный вкус черноплодной рябины, запах свойственны основному составу компонентов	Ярко выраженный вкус черноплодной рябины, запах свойственны основному составу компонентов
Консистенция	Разнообразная	Тягучая	Мягкая пастообразная	Пастообразная	Плотная засахаренная
Внешний вид	Сухая нелипкая поверхностьЦвет молочный	Сухая нелипкая поверхность Цвет от светло-коричневого (образец № 1) до коричневого (образец № 2)и темно-коричневого (образец № 3)			

Выводы. В результате исследования технологических особенностей получения помадной начинки в качестве вводимого компонента была выбраны выжимки черноплодной рябины, обладающей лечебными и профилактическими свойствами для организма человека. Опытным путем установлено необходимость замены сахара-песка на сахарную пудру для равномерного ее растворения в воде. Опытный образец № 2 отличается лучшими потребительскими характеристиками по всем органолептическим показателям. При обогащении помадной начинки выжимками черноплодной рябины, имеющиеся вих составе пищевые волокна и полифенольные соединения, оказывают положительное влияние на желудочно-кишечный тракт и организм человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Тимакова Р.Т. Оценка качества пшеничного хлеба, обогащенного натуральным яблочным сырьем. Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2020. № 2(44). – С. 22-28.

2. RenY.,FrankT., MeyerG., LeiJ., GrebencJ.R, SlaughterR., GaoY.G., KinghornA.D. PotentialBenefitsofBlackChokeberry(Aroniamelanocarpa) Fruits and Their Constituents in Improving Human Health. Molecules. 2022. Vol. 13;27(22):7823. DOI: 10.3390/molecules27227823.

3. Jakobek L., KenjerićD. C., PichlerA.,Simunovic J., KopjarM., Buljeta I. Structure, health benefits and identification of chokeberry polyphenols: A comprehensive review. Croatian journal of food science and technology. 2024. Vol.16. P.64-85. DOI:10.17508/CJFST.2024.16.1.06.

4. Жакупова Г.Н. Исследование и анализ физико-химического состава ирги черноплодной рябины./Г.Н. Жакупова, К.К. Макангали, А.Т. Сағандық, Г.М.Токышева// Вестник Алматинского технологического университета. 2023. – № 2. – С. 167-176.

5. ĆujićN., KardumN.,ŠavikinK., ZdunićG., JankovićT., MenkovićN..Potential of Chokeberry (AroniaMelanocarpa L.) as a therapeutic food. Holban AM, Grumezescu AM (Editors). In Handbook of Food Bioengineering, Academic Press, 2018. P. 209-237. ISBN 9780128115176.

6. Zhang Y., Zhao Y., Liu X., Chen X., Ding C., Dong L., Zhang J., Sun S., Ding Q., Khatoom S., Cheng Z., Liu W., Shen L., Xiao Fe. Chokeberry (Aroniamelanocarpa) as a new functional food relationship with health: an overview. Journal of Future Foods. 2021. Vol.1(2). P. 168-178. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2022.01.006.

7. Olechno E., Puścion-Jakubik A., Zujko M.E. Chokeberry (A. melanocarpa (Michx.) Elliott). A Natural Product for Metabolic Disorders? Nutrients. 2022. Vol.14(13):2688. DOI: 10.3390/nu14132688.

8. Jurikova T., Mlcek J., Skrovankova S., Sumczynski D., Sochor J., Hlavacova I., Snopek.L, Orsavova J. Fruits of Black Chokeberry Aroniamelanocarpa in the Prevention of Chronic Diseases. Molecules. 2017. Vol.22(6):944. DOI: 10.3390/molecules22060944.

9. Резниченко И.Ю. Разработка и оценка качества отделочного полуфабриката с плодово-ягодным сырьем. / И.Ю.Резниченко, М.И.Гутова, И.А.Бакин, А.С.Мустафина, А.Н.Табатарович// Вестник КрасГАУ, 2020. – № 12. – С. 222-231.

10. Zhang Y., Zhao Y., Liu X., Chen X., DingC., Dong L., Zhang J., SunS., Ding Q.,Khatoom S., Cheng Z., Liu W., Shen L., Xiao., F. Chokeberry (Aroniamelanocarpa) as a new functional

food relationship with health: an overview. Journal of Future Foods. 2021. – Vol. 1. – P.168-178. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2022.01.006.

11. Пономарева Е.И. Обоснование рациональной дозировки вяленой черноплодной рябины в производстве кексов / Е.И.Пономарева, С.И.Лукина, А.В.Паринова// Хлебопродукты. – 2018. – № 2. – С. 38-39.

12. Gao N., Shu C., Wang Y., Lang. Y., Jin C., Cui X., Jiang H., Liu S., Li Z., Chen W.,Xu H., Li B. Polyphenol components in black chokeberry (Aroniamelanocarpa) as clinically proven diseases control factors - An overview. Food Science and Human Wellness. – 2024. – Vol. 13. – P. 1152-1167. DOI: 13. 10.26599/FSHW.2022.9250096.

13. Go M.Y., Kim J., Jeon C.Y., Shin D.W. Functional Activities and Mechanisms of Aroniamelanocarpa in Our Health. Curr Issues Mol Biol. 2024. Vol.46(8). – P. 8071-8087. DOI: 10.3390/cimb46080477.

14. Kaloudi T., Tsimogiannis D.,Oreopoulou V. AroniaMelanocarpa: Identification and Exploitation of its Phenolic Components. Molecules. – 2022. – Vol. 27:4375.

15. Jurendic T., Scetar M. Aroniamelanocarpa Products and by-Products for Health and Nutrition: A Review. Antioxidants. 2021. – Vol. 10:1052.

16. Светлакова Н.А. Рябина черноплодная (Aroniamelanocarpa) как перспективное растительное сырье с адаптогенными свойствами. / Н.А. Светлакова, И.С. Милентьева// Пищевые инновации и биотехнологии: Сборник тезисов XII Всероссийской (национальной) научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 16 мая 2024 года. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2024. – С. 354-355.

17. Ghendov-Mosanu A.,Cristea E., Sturza R., Niculaua M., Patras A. Syntheticdye's substitution with chokeberry exractinjelly candies. J.Food SciTechnol.2020. Vol. 57 (12). – P. 4384-4394. DOI: 101007/s13197-020-04475-6.

18. Korenets Y., Goriainova,Iu, Radion N., Nazarenko I.,Simakova O. Substantiation of feasibility of using black chokeberry in the technology of products from shortcake dough. EEJET. Technology and equipment of food production. 2017. Vol. 2. – P. 25-31. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.98409.

19. Волкова Г.С. Обоснование выбора комплекса ферментов для биокаталитической обработки жмыха рябины черноплодной / Г.С. Волкова, Е.Н. Соколова, В.В. Ионов// Пищевая промышленность. – 2023. – № 5. – С. 23-25.

20. DenevP., KratchanovaM., PetrovaI.,KlisurovaD., GeorgievY., OgnyanovM., YanakievaI. BlackChokeberry (AroniaMelanocarpa(Michx.) Elliot) Fruits and Functional Drinks Differ Significantly in Their Chemical Composition and Antioxidant Activity. J. Chem.2018. – Vol. 2018. – P. 1-11. DOI:10.1155/2018/9574587.

21. Jurendić T., Ščetar M. Aroniamelanocarpa Products and By-Products for Health and Nutrition: A Review. Antioxidants. 2021. – Vol.10:1052. DOI: 10.3390/antiox10071052.

22. Волощенко Л.В., Копылова Н.Ю., Карайченцева А.В. Использование светлого альбумина крови в производстве мясных полуфабрикатов.. Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – №3 (34). – С. 35-36.

23. Волощенко Л.В., Салаткова Н.П. Функционально-технологические свойства сухих продуктов из крови сельскохозяйственных животных. Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – С. 41-42.

Статья поступила в редакцию 06.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.844, 658.235
EDN: ZKPNPF

ОБ УТОЧНЁННОМ РАСЧЁТЕ ОРОШЕНИЯ СТЕЛЛАЖЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

© Авторы 2025

SPIN: 5721-1570
AuthorID: 181476
ORCID: 0000-0002-2769-0086
ResearcherID: E-2182-2018

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Пожарная безопасность»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29

SPIN: 6575-6690
AuthorID: 949994

АРАКЧЕЕВ Александр Валерьевич, генеральный директор
ООО ФНПП «ГЕФЕСТ»
(*187022, Ленинградская обл., Тосненский р-н, пгт Форносово, Промышленная ул., д. 1-Г*)
SPIN:1076-8133
AuthorID: 664653
ORCID: 0000-0003-1561-2483
ResearcherID: K-2087-2018

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ,
заведующий лабораторией «Проблем безопасности транспортных систем»
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН
(199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я Линия Васильевского Острова, д.13),

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с хранением товарно-материальных ценностей на складах с использованием стеллажей и мезонинов. Проведен анализ нормативных документов, регламентирующих такое хранение, в том числе и в части обеспечения их пожарной безопасности складов. Ввиду не снижающегося риска возникновения пожаров на складах с высокостеллажным хранением продукции и сложности тушения пожаров обоснована актуальность применения автоматических установок водяного пожаротушения и сдерживания пожара. Приведены расчётные модели орошения фронтальной поверхности стеллажей и проведена оценки параметров спринклерной установки пожаротушения. Показано, что зона орошения фронтальной поверхности стеллажа имеет эллиптическую форму и приведены выражения для оценки её размеров. Приведены примеры параметров орошения для стеллажей, когда их высота меньше высоты склада, и когда стеллажи являются опорами перекрытия склада. Обоснована необходимость дальнейших исследований в данном направлении, в том числе и в части совершенствования нормативной базы, регламентирующей обеспечение пожарной безопасности высокостеллажных складов и их автоматического пожаротушения.

Ключевые слова: высокостеллажное складирование, пожар, тушение, автоматические установки пожаротушения, сдерживание пожара, зона орошения.

ABOUT THE UPDATED CALCULATION OF IRRIGATION OF RACKS BY AUTOMATIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

© The Author(s) 2025

TANKLEVSKY Leonid Timofeevich, doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Russian Federation, professor of the Department of Fire Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, Politechnicheskaya str., 29)
ARAKCHEEV Alexander Valerievich, general manager
FNPP «GEFEST»
(*187022, Leningrad region, Tosnensky district, Fornosovo village, Promyshlennaya str., 1-G)*
TARANTSEV Alexander Alexeevich, doctor of technical sciences, professor,
honored worker of the Higher School of the Russian Federation,
head of the Laboratory "Problems of Safety of Transport Systems"
N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
(199178, Russia, St. Petersburg, 12th Line of Vasilievsky Island, 13)

Abstract. The issues related to the storage of inventory in warehouses using shelving and mezzanines are considered. The analysis of regulatory documents regulating such storage, including in terms of ensuring their fire safety of

warehouses, has been carried out. Due to the continuing risk of fires in warehouses with high-shelf storage of products and the difficulty of extinguishing fires, the relevance of using automatic water extinguishing and fire suppression systems is justified. The calculated models of irrigation of the front surface of the racks are presented and the parameters of the sprinkler fire extinguishing system are estimated. It is shown that the irrigation zone of the front surface of the rack has an elliptical shape and expressions for estimating its size are given. Examples of irrigation parameters for racks are given when their height is less than the height of the warehouse, and when the racks are the supports of the warehouse floor. The necessity of further research in this area is substantiated, including in terms of improving the regulatory framework governing the fire safety of high-shelf warehouses and their automatic fire extinguishing.
Keywords: high-shelf warehousing, fire, extinguishing, automatic fire extinguishing systems, fire containment, irrigation zone.

Для цитирования: *Танклевский Л.Т. Об уточнённом расчёте орошения стеллажей автоматическими установками пожаротушения / Л.Т. Танклевский, А.В. Аракчеев, А.А. Таранцев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 123-127. – EDN: ZKPNPF.*

Введение. Рост объёма товарооборота как в нашей стране, так и в мире в целом предполагает краткосрочное, среднесрочное или длительное хранение товарно-материальных ценностей (ТМЦ) в складских комплексах [1, 2] (рис.1). Оптимизация использования площади и объёма склада обусловливает необходимость применения стеллажей [3, 4] и мезонинов [5] (рис.2). При этом мезонины, в отличие от стеллажей, предполагают наличие персонала на различных уровнях.

Рисунок 1 – Складской комплекс со стеллажным хранением ТМЦ

а) *б)*

Рисунок 2 – Хранение ТМЦ на высотных стеллажах (а) и мезонинах (б)

Небезынтересно отметить, что Свод правил [6], отменённый письмом от 25.04.2022 г. № 1086-ОГ/03, предусматривал использование высотных стеллажей в качестве опор покрытия и наружных стен, что и было реализовано на многих складах в период его действия.

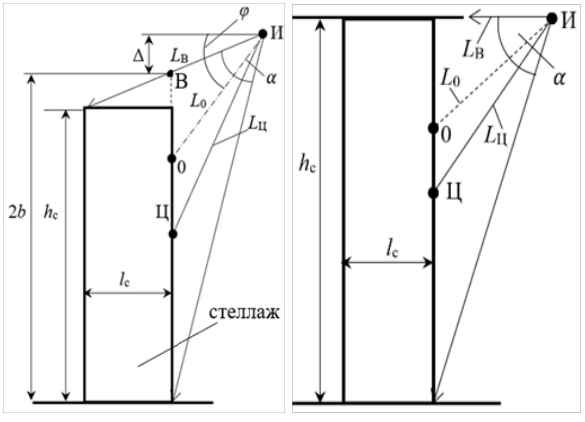
Однако опыт эксплуатации складов с высотными стеллажами в нашей стране и за рубежом выявил проблему их высокой пожароопасности. Пожары на таких складах отличаются быстрым распространением пламени по вертикали и потерей устойчивости колонн и пролётов стеллажей с последующим их обрушением, что представляет особую опасность (рис. 3) для персонала, пожарных и третьих лиц.

Методология обеспечения пожарной безопасности складов со стеллажным хранением ТМЦ помимо нормативных проектных решений [7] и строгого соблюдения правил пожарной безопасности [8] предполагает использование автоматических установок пожаротушения (АУП) [9, 10, 14], которые также могут выполнять и функцию сдерживания пожара [11] до прибытия пожарных подразделений.

С участием авторов проведены исследования

по применению спринклерных АУП для зашиты от пожара высотных стеллажей и опубликованы выражения [12, 13] в части оценивания параметров АУП. Показано, что при нормативных значениях давления воды в питающей магистрали перед оросителем траектория струи будет иметь линейный характер (рис. 4, также рис. 2 [10] и рис. 3 [12]), что упрощает расчётные оценки.

Рисунок 3 – Пожары и их последствия на складах со стеллажным хранением ТМЦ



а) *б)*

Рисунок 4 – Расчётные модели стеллажей (а – стеллаж не касается перекрытия, б – является опорой перекрытия). Обозначения: h_c, l_c – высота и ширина стеллажа; α – угол раствора оросителя И; φ – угол наклона оси оросителя (для случая «б» φ=0,5α); 0 – точка пересечения оси оросителя с плоскостью стеллажа

Зона орошения стеллажа, являющаяся пересечением условного конуса орошения с вертикальной фронтальной плоскостью стеллажа, представляет собой эллипс с центром в точке *Ц*, полуосями *a* и *b* (рис. 5) и площадью $S=\pi ab$.

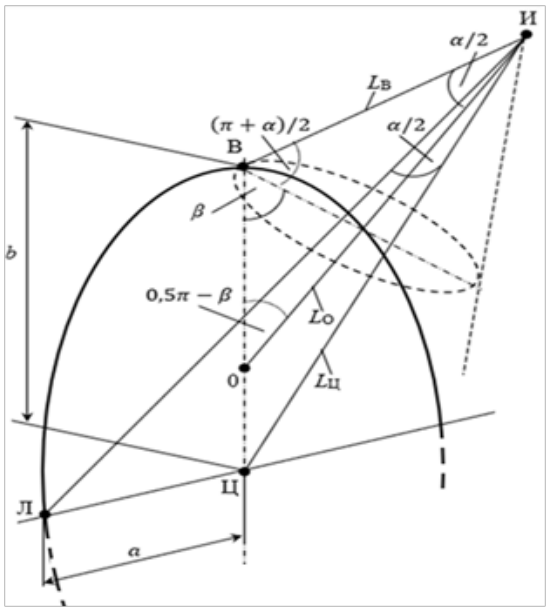
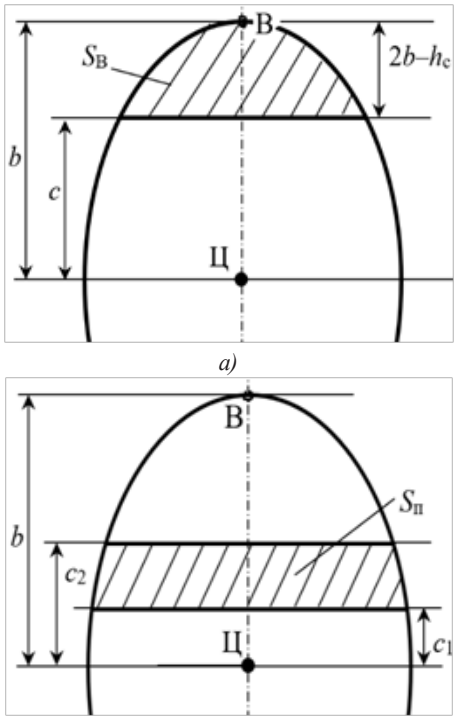


Рисунок 5 – Расчётная схема для зоны орошения в изометрии

Для схемы орошения на рисунке 4*а* на верхнюю часть стеллажа вода попадёт с площади $S_В$ рисунка 6*а*, которая может быть оценена по выражению

$$S_В = ab\left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{c}{b} - \frac{c}{b}\sqrt{1-\left(\frac{c}{b}\right)^2}\right] \quad (1)$$

(здесь $c=h_c-b$). Для стеллажа – опоры перекрытия (рис. 4*б*) очевидно: $S_В=0$.



а)

б)

Рисунок 6 – К оценке площади $S_В$ (а) и площади $S_п$ (б) орошения полки стеллажа

Для обеих схем (рис. 4) можно оценить фронтальную площадь орошения полки $S_п$ (рис. 6*б*) по

выражению:

$$S_п = ab\left[\gamma_2 - \gamma_1 + \frac{c_2}{b}\sqrt{1-\left(\frac{c_2}{b}\right)^2} - \frac{c_1}{b}\sqrt{1-\left(\frac{c_1}{b}\right)^2}\right], \quad (2)$$

где $\gamma_1 = arcsin\ c_1 / b$, $\gamma_2 = arcsin\ c_2 / b$.

Для схемы орошения стеллажа на рисунке 4*а*, когда исходными данными являются: размеры стеллажа h_c и l_c, расстояние L_u оросителя от фронтальной плоскости, угол α и возвышение Δ_u оросителя над верхней плоскостью стеллажа, полуоси a и b находятся в следующем порядке:

а) сначала определяются параметры φ, L_B и полуось b по формулам соответственно

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\Delta_u}{L_u + l_c}\right) + \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

$$L_B = L_u[\cos(\varphi - 0{,}5\alpha)]^{-1}, \quad (4)$$

$$b = 0{,}5[l_c \text{tg}(\varphi - 0{,}5\alpha) + h_c], \quad (5)$$

б) затем определяются параметры β и $L_ц$ по формулам соответственно

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_u}{2b}\sin\alpha\right) - \frac{\alpha}{2}, \quad (6)$$

$$L_ц = \sqrt{L_B^2 + b^2 - 2bL_B\sin(\alpha - \beta)}, \quad (7)$$

в) в итоге находим вторую полуось эллипса

$$a = L_u\ tg(0{,}5\alpha). \quad (8)$$

Применительно к случаю, когда стеллаж является опорой перекрытия (рис. 4*б*), выражения для оценки размеров эллипса упрощаются. Полуось a может быть также найдена из выражения (8), а углы φ и β:

$$\varphi = 0{,}5\alpha, \quad (9)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{L_u}{h_c}\sin\alpha\right) - \frac{\alpha}{2}, \quad (10)$$

расстояние L_u определяется по выражению

$$L_ц = \sqrt{L_u^2 + 0{,}25h_c^2 - L_u h_c \sin(\alpha - \beta)}, \quad (11)$$

полуось $b = 0{,}5h_c$.

Результаты. Рассмотрим примеры. Пусть применительно к общему случаю (рис. 4*а*) h_c=10 м, l_c=1м, L_u=2 м, Δ_u=1,5 м, α=60° (размеры заданы условно). Требуется найти размеры эллипса орошения a, b и площади S_B и $S_п$.

По выражениям (3)-(8) находим:

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{1{,}5}{2+1}\right) + 30° = 56{,}565°,$$

$L_B = 2[cos(56{,}565 – 30°)]^{-1} = 2{,}236$ м,

$b = 0{,}5[1 \cdot tg(56{,}565° – 30°)+10] = 5{,}25$ м,

$\beta = arccos(2.236/10{,}5 \cdot \sin(60°)) – 30° = 49{,}373°$,

$L_ц \approx \sqrt{5 + 27{,}563 - 10{,}5 \cdot 2{,}236\sin(10{,}627°)}$ м,

$a = 5{,}313 \cdot tg(30°) = 3{,}068$ м.

Тогда параметры эллипса орошения: a=3,068 м, b=5,25 м, фронтальная площадь орошения $S = \pi \cdot 3{,}068 \cdot 5{,}25 \approx 50{,}6$ м^2.

Площадь S_B находим по выражению (1) с учётом c=10 – 5,25=4,75 м, $c/b \approx 0{,}905$:

$$S_B \approx 16{,}107\left[1{,}5708 - \arcsin 0{,}905 - 0{,}905\sqrt{1-0{,}819}\right]$$

≈0,88 м^2.

Т.е. орошено будет 0,88 м^2 верхней плоскости стеллажа.

Площадь $S_п$ находим по выражению (2), полагая, что c_1 = 1 м, c_2 = 2 м. Тогда $c_1/b \approx 0{,}19048$, $c_2/b \approx 0{,}38095$, $\gamma_1 = arcsin\ (0{,}19048) = 0{,}19165$, $\gamma_2 = arcsin\ (0{,}38095) = 0{,}39082$. Получаем:

$$S_п \approx 16{,}107\left[0{,}39082 - 0{,}19165 + 0{,}38095\sqrt{1-0{,}1451} - 0{,}19165\sqrt{1-0{,}03673}\right] \approx 5{,}85 \text{ м}^2.$$

Небезынтересно отметить, что выражение (2) справедливо и когда полка находится ниже центра эллипса. Например, если c_1= -2 м, c_2= -1 м, то также получим $S_п \approx 5{,}85$ м^2.

Применительно к случаю, когда стеллаж является опорой перекрытия (рис 4*б*), пусть, как и ранее, h_c=10 м, L_u=2 м, α=60°. Тогда b=0,5h_c=5 м, β=*arccos*(0,2 sin60°) – 30°=50°, расстояние $L_ц = \sqrt{4 + 25 - 20\sin(60° - 50°)}$ = 5,0524 м, полуось a=5,0524 · tg30°≈ 2,917 м, площадь эллипса орошения $S_o = \pi \cdot 2{,}917 \cdot 5 = 45{,}82$ м^2.

Фронтальная площадь орошения полки $S_п$ также может быть оценена по выражению (2).

Обсуждение. Показано, что при подаче воды спринклерной АУП на стеллаж для хранения ТМЦ зона орошения фронтальной поверхности стеллажа будет иметь эллиптическую форму, параметры которой обусловливаются расположением, ориентацией и характеристиками оросителя.

Знание параметров хоны орошения позволит принимать эффективные проектные решения по созданию сети оросителей, применяемых не только для тушения пожара на стеллаже, но и для сдерживания его распространения путём смачивания полок и ТМЦ на них, находящихся вблизи от очага пожара.

Выводы. Таким образом, ввиду тенденции к росту числа складов ТМЦ с высокостеллажным хранением показана необходимость принятия правильных проектных решений по созданию эффективной системы противопожарной защиты с использованием АУП.

Представлен порядок определения зоны орошения стеллажа спринклерной АУП как для тушения пожара, так и для сдерживания его распространения.

В дальнейшем планируется дать количественные оценки по определению интенсивности по всей зоне орошения, а также по оптимизации многоуровневого размещения оросителей на складах с высокостеллажным хранением ТМЦ. Также могут быть сформулированы предложения для внесения в нормативные документы в части проектирования систем противопожарной защиты таких складов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. СП 56.13330.2021 Производственные здания. СНиП 31-03-2001.
2. ГОСТ Р 59282-2020 Системы управления складом. Функциональные требования.
3. ГОСТ Р 55525-2017 Складское оборудование. Стеллажи сборно-разборные. Общие технические условия.
4. ГОСТ Р 57381 2017 Складское оборудование. Стеллажи полочные. Общие технические условия.
5. ГОСТ Р 59912-2021 Складское оборудование. Мезонины складские на колоннах. Общие технические условия.
6. СП 57.13330.2011 Складские здания (актуализированная редакция СНиП 31-04-2001*). Отменен письмом Федерального агентства по техническому регулированию и

метрологии от 25.04.2022 г. № 1086-ОГ/03.

7. СП 2.13130.2020 Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты.

8. Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 г. № 1479 "Об утверждении Правил противопожарного режима в РФ" (с изменениями и дополнениями).

9. СП 241.1311500.2015 Системы противопожарной защиты. Установки водяного пожаротушения высотных стеллажных складов автоматические. Нормы и правила проектирования.

10. ВНПБ 40-20 Автоматические установки водяного пожаротушения «АУП-ГЕФЕСТ». Проектирование. Стандарт организации СТО 420541-005. М., 2020, 72 с.

11. ГОСТ Р 71080-2023 Установки сдерживания пожара водяные автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний.

12. Копылов С.Н., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабиков И.А., Аракчеев А.В. Расчётная оценка геометрических параметров спринклерных установок водяного пожаротушения высотных стеллажей // Пожарная безопасность, 2020 №3 (89). – С.62-69.

13. Маркус Е.С., Снегирев А.Ю., Кузнецов Е.А., Танклевский Л.Т., Аракчеев А.В. Численное моделирование распространения пламени по дискретной совокупности горючих материалов // Пожаровзрывобезопасность. 2019. Т. 28. – № 4. – С. 29-41.

14. Аракчеев А.В., Танклевский А.Л. Использование технологии принудительного пуска спринклеров для защиты многоуровневых автостоянок // Алгоритм безопасности. 2016. № 3. – С. 32-33.

Статья поступила в редакцию 28.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.849: 614.844.2
EDN: ZUEJIG

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМОДИФИКАТОРОВ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ОГНЕТУШАЩИХ И ЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2341-7695
AuthorID: 1214692
ORCID: 0000-0003-0257-262X

КИСЕЛЕВА Виктория Сергеевна, адъюнкт
Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России
(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149, e-mail: s-kiseleva1@mail.ru)

SPIN: 6886-9928
AuthorID: 792929
ORCID: 0000-0002-4854-9321
ResearcherID: A-3805-2015

ИВАНОВ Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Пожарная безопасность технологических процессов и производств»
Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России
(196105, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149, e-mail: ivanov.av@igps.ru)

Аннотация. В данной статье приведены аналитические зависимости влияния углеродных наномодификаторов на термостойкую стабильность огнетушащих и защитных составов, применяемые в роботизированных установках пожаротушения при горении нефтепродуктов. Установлено, что введение углеродных наноструктур в огнетушащий состав на основе раствора синтетического пенообразователя «S» (2-6 масс. %) индуцирует переход от поверхностного к объемному кипению за счет зарождения центров кипения, приводящих к формированию равномерно распределенных паровых пузырьков диаметров ± 0,5 мм. Данный механизм снижает локальные тепловые нагрузки и увеличивает «время жизни» пленки. В защитных составах на основе неорганического вяжущего добавление углеродных наноструктур способствует образованию макропористой структуры, что снижает теплопроводность материала благодаря формированию теплоизолирующих воздушных полостей. Атомно-силовая микроскопия подтвердила локализацию наноструктур на границах пор, создающих барьерный эффект для теплопереноса. Результаты исследования обосновывают применение углеродных наноструктур для в огнетушащих и защитных составах роботизированных установок пожаротушения.

Ключевые слова: углеродные наноструктуры, раствор пенообразователя, неорганический вяжущий, АСМ-анализ, высокоскоростная камера, процесс кипения, нуклеация, термостойкость, тепловые барьеры.

INFLUENCE OF CARBON NANOMODIFIERS ON THERMAL STABILITY OF FIRE EXTINGUISHING AND PROTECTIVE COMPOSITIONS

© The Author(s) 2025

KISELEVA Victoria Sergeevna, adjunct
Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: e-mail: s-kiseleva1@mail.ru)
IVANOV Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor at the department of fire safety technological processes and production
Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky prospect, 149, e-mail: e-mail: ivanov.av@igps.ru)

Abstract. This article presents analytical dependencies of the influence of carbon nanomodifiers on the heat-resistant stability of fire extinguishing and protective compositions used in robotic fire extinguishing systems for burning petroleum products. It was found that the introduction of carbon nanostructures into a fire extinguishing composition based on a solution of synthetic foaming agent "S" (2-6 wt.%) induces a transition from surface to volumetric boiling due to the nucleation of boiling centers, leading to the formation of uniformly distributed steam bubbles with diameters of ± 0.5 mm. This mechanism reduces local thermal loads and increases the "lifetime" of the film. In protective compositions based on an inorganic binder, the addition of carbon nanostructures promotes the formation of a macroporous structure, which reduces the thermal conductivity of the material due to the formation of heat-insulating air cavities. Atomic force microscopy confirmed the localization of nanostructures at the boundaries of pores, creating a barrier effect for heat transfer. The results of the study substantiate the use of carbon nanostructures in fire extinguishing and protective compositions of robotic fire extinguishing systems.

Keywords: carbon nanostructures, foaming agent solution, inorganic binder, AFM analysis, high-speed camera, boiling process, nucleation, heat resistance, thermal barriers.

Для цитирования: *Киселева В.С. Влияние углеродных наномодификаторов на термическую стабильность огнетушащих и защитных составов / В.С. Киселева, А.В. Иванов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 128-132. – EDN: ZUEJIG.*

Введение. Современные роботизированные установки пожаротушения (РУП) играют ключевую роль в обеспечении безопасности на многих объектах, связанных с хранением и переработкой нефтепродуктов [1, 2]. Одной из основных проблем при тушении таких пожаров является высокая температура горения, что приводит к снижению эффективности огнетушащих (ОТВ) и защитных составов (ЗС) [3, 8]. Водосодержащие ОТВ и ЗС широко применяются благодаря их доступности, экологичности безопасности и высокими эксплуатационными характеристиками. Однако их использование в условиях высокотемпературного горения нефтепродуктов требует повышения термостойкости, что является актуальной научно-технической задачей.

Термостойкость ОТВ и ЗС определяется их способностью сохранять стабильность и эффективность при воздействии высоких температур [4, 6]. Это свойство напрямую связано с физико-химическими процессами, происходящими в составе при нагревании, такими как испарение воды, термическое разложение добавок и образование защитных слоев. Углеродные наноструктуры (УНС) способны регулировать указанные процессы за счет усиления теплопереноса [7]. Изучение этих процессов в наноматериалах позволяет разработать механизмы повышения термостойкости, что в свою очередь способствует увеличению эффективности ОТВ и продлению срока службы РУП.

Целью данной работой является научное обоснование физических механизмов повышения термостойкости водосодержащих ОТВ и ЗС, применяемых в РУП при горении нефтепродуктов за счет модифицирования УНС.

Методология. В исследовании использовались термостойкости, в качестве ОТВ были использованы водные растворы синтетического пенообразователя (ПО) типа «S» с концентрацией 2 и 6 масс. %. В качестве ЗС для проведения исследований использовались композитные материалы на основе неорганического вяжущего [9]. Огнетушащие и защитные составы были модифицированы УНС (астраленами) [10].

Характеристики исследуемых ОТВ и ЗС представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Характеристики огнетушащих составов

№ п/п	Состав ОТВ	Концентрация ПО, %	Концентрация УНС, масс. %
1.	2% «S»	2%	0
2.	2% «S» + Astr	2%	0,01
3.	2% «S» + Astr	2%	0,02
4.	2% «S» + Astr	2%	0,05
5.	2% «S» + Astr	2%	0,1
6.	6% «S»	6%	0
7.	6% «S» + Astr	6%	0,01
8.	6% «S» + Astr	6%	0,02
9.	6% «S» + Astr	6%	0,05
10.	6% «S» + Astr	6%	0,1

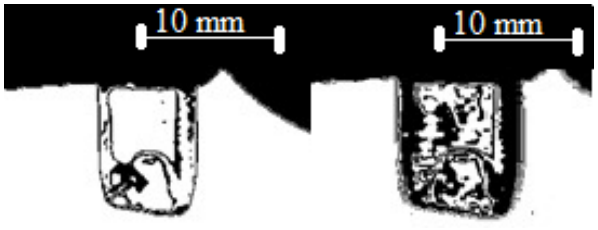
Таблица 2 – Характеристики композитных материалов

Наименование	Состав модификатора	Концентрация УНС, масс. %
1	Композит, состоящий из антиусадочной добавки на основе наночастиц диоксида кремния (состав 1)	0
2	Композит, состоящий из антиусадочной добавки на основе наночастиц диоксида кремния (состав 1)	0,10
3	Композит, состоящий из антиусадочной добавки на основе наночастиц диоксида кремния (состав 1)	0,15
4	Композит, состоящий из пластифицирующего стабилизатора на основе наночастиц гидроксида алюминия (состав 2)	0
5	Композит, состоящий из пластифицирующего стабилизатора на основе наночастиц гидроксида алюминия (состав 2)	0,10
6	Композит, состоящий из пластифицирующего стабилизатора на основе наночастиц гидроксида алюминия (состав 2)	0,15

Исследование процессов кипения водосодержащих ОТВ включало в себя пробоподготовку образцов и их исследования процесса кипения в емкости. Для обеспечения однородности растворов ПО «S» (2 и 6 масс. %) и астраленов (0,01-0,1 масс. %) проводили диспергирование с использованием ультразвуковой ванны (40 кГц, 100 Вт, 30 мин, 20°С) [11-13]. В ходе эксперимента образец ОТВ в стеклянной колбе объемом 0,1 мл нагревался пропан-бутановой горелкой с расходом 73 г/час и давлением 0,1 Мпа на расстоянии 0,1 м. Процесс кипения фиксировался высокоскоростной камерой с частотой съемки 1000 кадр/с, разрешением 1280x720 пикселей при светодиодном освещении [14].

Исследование пористой структуры композитного материала проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе «*NTEGRA-SPECTRA*» [15]. Использовался кантилевер «*CSG01*», с радиусом острия 10 нм в полуконтактном режиме. Сканирование поверхности проводилось при контролируемой амплитуде колебаний зонда, при температуре окружающей среды 19ºС. Регистрация данных включала анализ амплитудно-фазовых характеристик сигнала для количественной оценки морфологических параметров: глубины пор, распределения размеров. Обработка результатов осуществлялась в программном обеспечении «*Image Analysis* 3.5.0.2069» с построением 2*D*-топограммы поверхности и «*OriginPro*» для построения гистограмм размеров пор, распределенных на поверхности образца.

Результаты. Экспериментальные исследования процессов кипения водных растворов ПО, модифицированных УНС, выявили значимое влияние наноструктур на режим кипения ОТВ. Высокоскоростная видеосъемка зафиксировала, что введение астраленов инициирует переход от поверхностного пузырькового кипения, характерного для контрольных образцов (рис. 1*а*) [16], к объемному кипению с равномерным распределением паровых пузырьков по всему объему жидкости (рис. 1*б*).

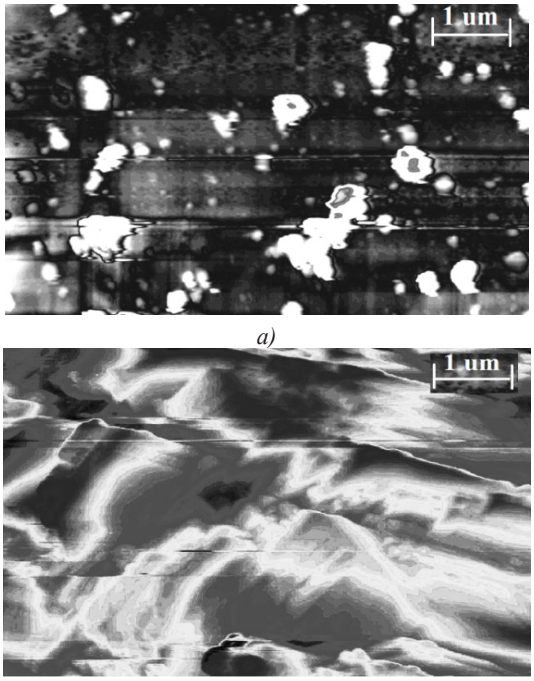


а) *б)*

Рисунок 1 – Фотографии процесса кипения а) немодифицированного ОТС, б) модифицированного ОТС

В контрольных составах наблюдалась паровой пленки между стенкой и объемом жидкости, что сопровождалось нестабильностью теплопереноса и быстрым разрушением пленки ПО. В модифицированных растворах зафиксировано зарождение и активное образование паровых пузырьков, распределенных по всему объему жидкости.

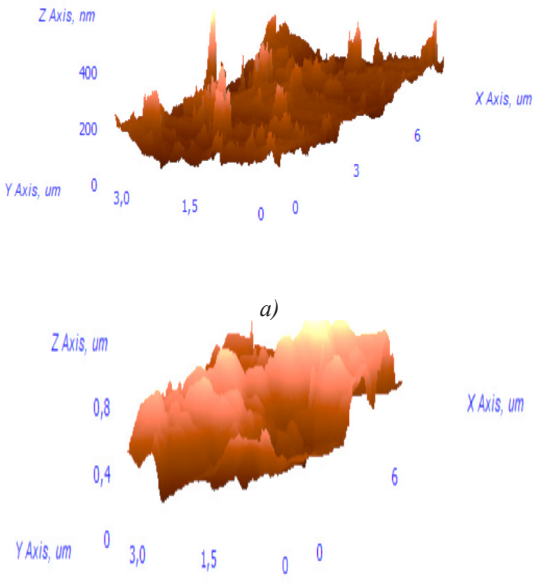
Анализ исследования морфологии структуры композитных материалов после термического воздействия, полученных методом АСМ, продемонстрировал, что введение астраленов в матрицу неорганического вяжущего приводит к увеличению шероховатости поверхности, а также инициирует формирование в топологии поверхности артефактов, связанных с неоднородностью распределения наночастиц в композите (рис. 2, 3) [17].



а)

б)

Рисунок 2 – Структура защитного материала 2-D а) без УНС б) с УНС



а)

б)

Рисунок 3 – Структура защитного материала 3-D а) без УНС б) с УНС

Обсуждение. Интеграция УНС диаметром 10-20 нм в ОТВ и ЗС демонстрирует их значимое влияние на термомеханические свойства материалов, обусловленное модификацией микроструктуры и динамики фазовых переходов.

В модифицированном ОТВ индуцирует переход от поверхностного к объемному пузырьковому кипению, что принципиально меняет механизм парообразования. В контрольных образцах (без УНС) локализация паровых пузырьков в отдельных зонах приводит к быстрому разрушению пленки ПО (3-5 с) из-за прямого теплового контакта жидкости с нагретой поверхностью. Введение наноструктур, выступающих центрами гетерогенной нуклеации [18], снижает энергию активации образования паровых зародышей, что подтверждается формированием множества мелких пузырьков (приблизительно 0,5 мм), равномерно распределенных по объему (рис. 4, 5).

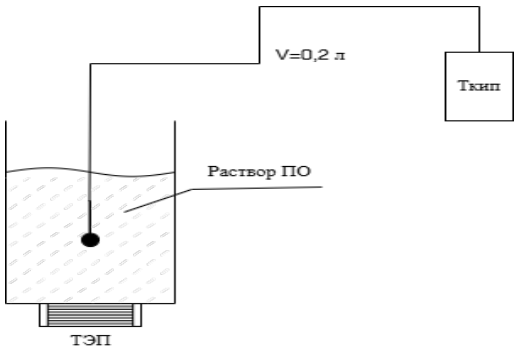


Рисунок 4 – Принципиальная схема процесса нагрева до температуры кипения

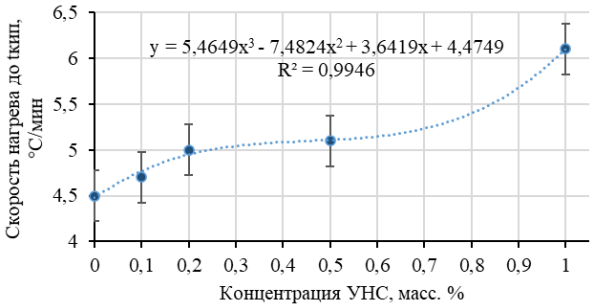


Рисунок 5 – Зависимость скорости нагрева до температуры кипения от концентрации УНС

Этот результат согласуется с теорией зарождения пузырьков [19], где показано, что наночастицы уменьшают критический размер зародышей, стабилизируя их рост. Равномерное кипение создает теплоизолирующий барьер, замедляющий испарение воды на 25% и увеличивая время жизни пленки в 6 раз [20, 21]. Такая стабилизация теплопереноса критически важна для предотвращения повторного возгорания и повышения эффективности РУП.

В защитных составах на основе неорганического вяжущего ключевым фактором улучшения термостойкости является модификация неорганического вяжущего путем диспергирования УНС [21]. АСМ-анализ выявил, что при увеличении концентрации астраленов до 0,15 масс. %. перепады высот поверхности варьируется в диапазоне 0,2-0,4 мкм, отражая неоднородность микрорельефа (рис. 6) [22].

Наноструктуры локализуются на границах пор, формируя разветвленную сеть макропор (1-5 мкм), которые действуют как тепловые барьеры [22]. Такая структура не только снижает теплопроводность, но и обеспечивает механическую стабильность при высокотемпературном воздействии (рис. 7).

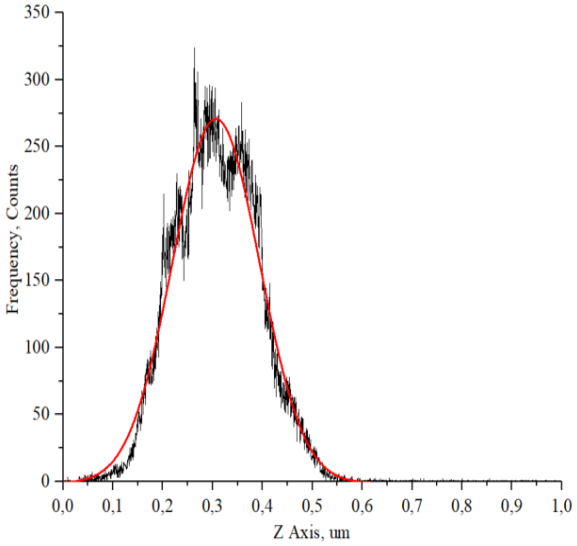


Рисунок 6 – Гистограмма распределения пор в матрице неорганического вяжущего, модифицированного 0,15 масс. % УНС

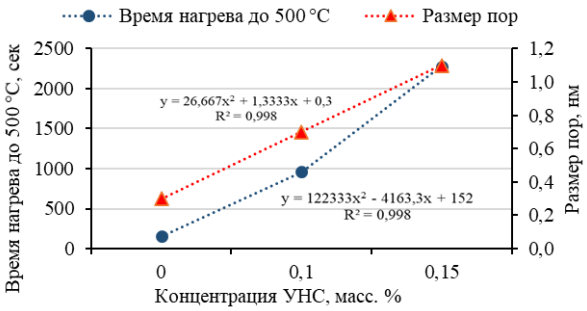


Рисунок 7 – Совмещенный график зависимости времени нагрева и размеров пор от диапазона концентраций УНС

Синергия между модификацией жидких и твердых фаз подчеркивает универсальность УНС как мультифункциональных добавок. В огнетушащих растворах они обеспечивают «активную» термозащиту через управление кипением [23], тогда как в композитах реализуют «пассивный» механизм, формируя поры, замедляющие теплоперенос [24].

Выводы. Проведенные исследования позволили научно обосновать физические механизмы, обеспечивающие повышение термостойкости водосодержащих ОТВ и ЗС, модифицированных УНС, для

применения в РУП при горении нефтепродуктов.

1. Введение УНС в концентрации 0,05 масс. % индуцирует переход от поверхностного к объёмному пузырьковому кипению, что устраняет локальные перегревы и увеличивает «время жизни» пенной пленки с 3-5 до 28-32 секунд.

2. Добавление 0,15 масс. % астраленов формирует макропористую структуру, что снижает теплопроводность материала на 50% (с 0,8 до 0,4 Вт/м•°С) за счет воздушных полостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ Р 53326-2009. Техника пожарная. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний.

2. Горбань Ю.И. и др. Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2023. – Т. 32. – №. 4. – С. 58-67.

3. Севинчан Э., Динсер И., Лэнг Х. Обзор методов терморегулирования роботов // Прикладная теплотехника. – 2018. – Т. 140. – С. 799-813.

4. Таранцев А.А., Пивоваров Н.Ю. Расчетная оценка водоотдачи тупиковых сетей наружного противопожарного водоснабжения // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – №. 9. – С. 73-78.

5. Huang A.C., Cao F.C., Ma X.Y. A comparative approach study on the thermal and calorimetric analysis of fire-extinguishing powders // Safety. – 2024. – Т. 10. – №. 1. – С. 31.

6. Leszczyńska A. et al. Polymer/montmorillonite nanocomposites with improved thermal properties: Part I. Factors influencing thermal stability and mechanisms of thermal stability improvement // Thermochimica acta. – 2007. – Т. 453. – №. 2. – С. 75-96.

7. Xu Z., Buehler M.J. Nanoengineering heat transfer performance at carbon nanotube interfaces // ACS nano. – 2009. – Т. 3. – №. 9. – С. 2767-2775.

8. Челентано Л., Сицилиано Б., Виллани Л. Роботизированная система для тушения пожаров в туннелях // IEEE International техника безопасности и аварийно-спасательные работы, семинар, 2005. – IEEE, 2005. – С. 253-258.

9. Халил А., Сон С., Челик К. Термические свойства и стабильность реакционноспособного магнезиального цемента // Строительство и строительные материалы. – 2021. – Т. 308. – С. 125102.

10. Shames A.I., Katz E. A., Panich A.M., Mogilyansky D., Mogilko E., Grinblat J., Belousov V.P., Belousova I. M., Ponomarev A.N. Structural and magnetic resonance study of astralen nanoparticles // Diamond and Related Materials. 2009. – Vol. 8. – No. 2-3. – P. 505-510.

11. Иванов А.В. и др. Управление электростатическими свойствами жидких углеводородов, модифицированных углеродными наноструктурами // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – №. 7. – С. 16-27.

12. Иванов А.В. и др. Физико-технологические принципы и методика управления пожароопасными процессами при обращении с жидкими углеводородами в условиях стабилизации наноструктур // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – №. 12. – С. 7-18.

13. Sato K. et al. Ultrasonic dispersion of TiO2 nanoparticles in aqueous suspension // Journal of the American Ceramic Society. – 2008. – Т. 91. – №. 8. – С. 2481-2487.

14. Luke A., Cheng D.C. High speed video recording of bubble formation with pool boiling //International journal of thermal sciences. – 2006. – Т. 45. – №. 3. – С. 310-320.

15. Joddar B. et al. Development of functionalized multi-walled carbon-nanotube-based alginate hydrogels for enabling biomimetic technologies // Scientific reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 32456.

16. Hetsroni G. et al. The effect of surfactants on bubble growth, wall thermal patterns and heat transfer in pool boiling // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2001. – Т. 44. – №. 2. – С. 485-497.

17. Yao Y., Lu H. Mechanical properties and failure mechanism of carbon nanotube concrete at high temperatures //Construction and Building Materials. – 2021. – Т. 297. – С. 123782.

18. Wu K.J. et al. Nucleation and growth in solution synthesis of nanostructures–from fundamentals to advanced applications // Progress in Materials Science. – 2022. – Т. 123. – С. 100821.

19. Karthika S., Radhakrishnan T.K., Kalaichelvi P. A review of classical and nonclassical nucleation theories //Crystal Growth & Design. – 2016. – Т. 16. – №. 11. – С. 6663-6681.

20. Киселева, В.С. Разработка наномодифицированного огнетушащего состава для роботизированных установок пожаротушения на объектах транспортировки нефтепродуктов / В.С. Киселева // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 3(67). – С. 196-203. – DOI 10.61260/1998-8990-2023-3-196-203. – EDN: ELXBNV.

21. Falsafi S.R. et al. Morphology and microstructural analysis of bioactive-loaded micro/nanocarriers via microscopy techniques; CLSM/SEM/TEM/AFM // Advances in Colloid and Interface Science. – 2020. – Т. 280. – С. 102166.

22. Liu L. et al. Present status and prospects of nanostructured thermal barrier coatings and their performance improvement strategies: A review // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Т. 97. – С. 12-34.

23. Rabajczyk A., Zielecka M., Gniazdowska J. Application of nanotechnology in extinguishing agents // Materials. – 2022. – Т. 15. – №. 24. – С. 8876.

24. Yin X. et al. Recent progress in 1D nanostructures reinforced carbon/carbon composites // Advanced Functional Materials. – 2022. – Т. 32. – №. 35. – С. 2204965.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.45
EDN: VBWLFF

РАЗРАБОТКА ШКАЛЫ УРОВНЕЙ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ МЕТОДОМ ДЕЛЬФИ

© Авторы 2025

SPIN: 4073-9010
AuthorID: 888266
ORCID: 0000-0002-2316-8661
Scopus ID: 57214692444

КУЛЕШОВ Владимир Владимирович, старший преподаватель
кафедры «Промышленная экология и безопасность»
Омский государственный технический университет
(644050, Россия, Омск, пр. Мира 11, e-mail: vmvvk@mail.ru)

SPIN: 5350-3579
AuthorID: 689956
ORCID: 0000-0002-8325-1598
Scopus ID: 57204675457

БОГДАНОВ Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: bav-64@mail.ru)

Аннотация. Развитие культуры безопасности рассматривается как один из ключевых факторов устойчивого функционирования организаций и повышения эффективности систем управления охраной труда. Однако на практике оценка уровня зрелости культуры безопасности УКБ часто осуществляется на основе субъективных, качественных характеристик, что ограничивает возможность объективного анализа и сопоставления между различными организациями. Целью настоящего исследования стало обоснование процентных границ пяти уровней зрелости культуры безопасности (низкий, умеренный, средний, высокий, превосходный) на основе экспертного консенсуса. В качестве методологической основы был использован метод Дельфи, включающий два этапа анонимного анкетирования 20-ти экспертов, обладающих профессиональной компетентностью и опытом в сфере охраны труда. На первом этапе выявлено значительное расхождение в оценках границ уровней зрелости, что позволило зафиксировать диапазон мнений. На втором этапе участникам были предоставлены обобщённые результаты и предложено пересмотреть свои оценки, в результате чего был достигнут консенсус, а границы между уровнями стали чётко различимыми и не пересекающимися. Итоговая шкала уровня зрелости культуры безопасности УКБ охватывает диапазон от 0 до 100 % и может использоваться для количественной диагностики текущего состояния культуры безопасности, мониторинга изменений, постановки целевых ориентиров и формирования программ по её развитию. Результаты исследования имеют практическую значимость и могут быть использованы в организациях различных отраслей.

Ключевые слова: культура безопасности, охрана труда, уровень зрелости, количественная оценка, метод Дельфи, система управления охраной труда, непрерывное улучшение, превентивные индикаторы, анкетирование.

DEVELOPMENT OF A SCALE OF SAFETY CULTURE LEVELS USING THE DELPHI METHOD

© Authors 2025

KULESHOV Vladimir Vladimirovich, senior lecturer at the Department of Industrial Ecology and Safety
Omsk State Technical University
(ave. Mira 11, Omsk, 644050, Russia, e-mail: vmvvk@mail.ru)

BOGDANOV Andrey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor of the Department of Life Safety
South Ural State University (National Research University)
(76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia, e-mail: bav-64@mail.ru)

Abstract. The development of safety culture is considered a key factor in the sustainable operation of organizations and the effectiveness of occupational health and safety management systems. In practice, however, the assessment of the maturity level of safety culture SCL is often based on subjective, qualitative characteristics, which limits the potential for objective analysis and comparison across different organizations. The purpose of this study was to establish evidence-based percentage boundaries for five levels of safety culture maturity (low, moderate, average, high, and excellent) through expert consensus. A modified Delphi method was used as the methodological basis, involving two rounds of anonymous surveys with 20 experts possessing professional competence and practical experience in the field of occupational health and safety. The first round revealed a wide variation in assessments, which provided a basis for analyzing the range of expert opinions. In the second round, participants were presented with aggregated results and asked to reconsider their responses. As a result, a consensus was reached, and clearly distinguishable, non-overlapping boundaries were established. The final level of safety culture scale covers a range from 0 to 100% and can be used for

quantitative diagnostics of the current state of safety culture, monitoring of changes, goal-setting, and the development of improvement programs. The results of the study are practically applicable across various industries.

Keywords: safety culture, occupational safety, maturity level, quantitative assessment, Delphi method, OHS management system, continuous improvement, leading indicators, survey.

Для цитирования: *Кулешов В.В. Разработка шкалы уровней культуры безопасности методом Дельфи / В.В. Кулешов, А.В. Богданов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 133-137. – EDN: VBWLFF.*

Введение. Вопрос формирования зрелой культуры безопасности сегодня приобретает особую значимость как с научной, так и с прикладной точек зрения [1-4]. Устойчивое функционирование систем охраны труда невозможно без понимания текущего уровня развития культуры безопасности в организации [5-7]. Однако на практике до сих пор отсутствуют чёткие количественные ориентиры, позволяющие объективно оценить её уровень. Сложность заключается в том, что большинство существующих моделей содержат качественные описания, но не дают конкретных числовых границ между уровнями зрелости. Это создаёт трудности при сравнении, мониторинге и планировании мероприятий по её улучшению.

Ряд исследований затрагивает аспекты формирования культуры безопасности, включая подходы к её оценке [8-11]. Однако обобщённой и верифицированной шкалы, позволяющей определить уровень культуры безопасности на основании конкретного числового показателя, до сих пор не сформировано. Как правило, границы между уровнями задаются интуитивно или на основе субъективного опыта отдельных авторов. В то же время потребность в такой шкале растёт, так как оценка и повышение уровня культуры безопасности является одним из важных вопросов в настоящее время [12-14].

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью устранить данный пробел. Создание шкалы, в основе которой лежит экспертный консенсус и пошаговая процедура обоснования границ уровней, позволит унифицировать подходы к оценке культуры безопасности. Это даст возможность не только фиксировать текущий уровень, но и отслеживать динамику, корректировать цели и определять точки роста. Предлагаемый инструмент нацелен на практическое применение и может быть адаптирован под различные отрасли и специфики производственной среды.

Методология. Целью настоящего исследования являлось определение обоснованных процентных границ пяти уровней зрелости культуры безопасности на основе консенсуса экспертов, обладающих практическим опытом работы в области охраны труда и промышленной безопасности. В качестве инструмента был выбран метод Дельфи, основанный на многораундовом анонимном экспертном анкетировании. Его особенностью является возможность проведения поэтапного анкетирования и достижения итогового консенсуса между экспертами в исследуемом вопросе [15, 16].

На подготовительном этапе было определено установить процентные границы для пяти уровней зрелости культуры безопасности УКБ – «низкий», «умеренный», «средний», «высокий» и «превосходный». При этом процентные границы характеризуются показателем культуры безопасности КБ, который изменяется в диапазоне от 0 до 100% (от 0 до 1), а каждый уровень должен иметь чётко определённые, не пересекающиеся границы.

В качестве респондентов были выбраны 20 экспертов, обладающих профессиональной компетентностью в области охраны труда. Для отбора респондентов были установлены следующие критерии: наличие профильного образования, опыт работы от пяти лет, практическое участие в оценке и развитии систем управления охраной труда. Средний профессиональный стаж экспертной группы составил 13 лет, при этом 70% из них имели опыт проведения аудитов по вопросам охраны труда.

В рамках первого этапа экспертам было предложено самостоятельно определить процентные границы каждого из пяти уровней зрелости культуры безопасности УКБ. Инструкция допускала произвольную интерпретацию и предлагала, по возможности, дополнительно аргументировать выбранные значения показателя культуры безопасности КБ. Все значения показателя КБ должны были находиться в пределах от 0 до 100%, при этом суммарная шкала охватывала весь диапазон.

Результаты первого раунда подтвердили ожидаемое разнообразие взглядов: диапазоны варьировались довольно широко. Например, границы для «низкого» уровня культуры безопасности составляли 0-24% у одних экспертов, 0-40% у других. Между уровнями «умеренный» и «средний» наблюдалось значительное пересечение (от 50 до 60%), а между «высоким» и «превосходным» область пересечения наблюдалась с 90 до 95%.

На основе собранных данных были рассчитаны минимальные и максимальные значения показателя КБ для каждого уровня, определены медианные и средние значения (табл. 1), а также произведён предварительный анализ степени расхождения позиций экспертов.

На втором этапе анкетирования каждому участнику было направлено обобщённое описание результатов первого раунда, включающее:

– статистические сводки (минимум, максимум,

медианный интервал);

– графическое представление диапазонов;

– выдержки из аргументации (анонимно);

– обновлённая форма анкеты с просьбой, при необходимости, пересмотреть свои оценки.

Экспертам поставили задачу: дать повторные значения границ уровней культуры безопасности с возможностью как сохранить предыдущие оценки, так и откорректировать их в свете групповой обратной связи. Такой подход позволил минимизировать крайние значения, сгладить разночтения и зафиксировать устойчивые обобщённые значения.

По итогам второго этапа консенсус был достигнут: все 20 участников подтвердили близкие или полностью идентичные оценки границ. Диапазоны уровней стали чётко различимыми, пересечений не наблюдалось. Разброс значений сократился до минимального уровня (отклонения не превышали ±5%). Итоговые границы уровней культуры безопасности сведены в таблицу 2.

Таблица 1 – Обобщённые границы уровней культуры безопасности по результатам 1-го этапа

Наименование уровня культуры безопасности УКБ	Показатель культуры безопасности КБ, % минимум	Показатель культуры безопасности КБ, % максимум	Показатель культуры безопасности КБ, % медианный интервал
Низкий	0	40	0-30
Умеренный	26	70	31-60
Средний	50	85	61-80
Высокий	71	95	81-95
Превосходный	90	100	96-100

Таблица 2 – Итоговые границы уровней культуры безопасности по результатам 2-го этапа

Наименование уровня культуры безопасности УКБ	Показатель культуры безопасности КБ, % Медианный интервал	Показатель культуры безопасности КБ
Низкий	0-30	0-0,30
Умеренный	31-60	0,31-0,60
Средний	61-80	0,61-0,80
Высокий	81-95	0,81-0,95
Превосходный	96-100	0,96-1,00

Результаты. Таким образом, проведение второго этапа позволило зафиксировать устойчивую шкалу, которую можно считать валидированной экспертным мнением. Было принято решение не проводить третий этап, так как критерий консенсуса был достигнут в полной мере.

Результаты, приведенные в таблице 2, можно представить в виде системы для определения уровня культуры безопасности:

$$УКБ = \begin{cases} УКБ_{ПУ}, \text{ если } 0{,}96 < КБ \leq 1; \\ УКБ_{ВУ}, \text{ если } 0{,}8 < КБ \leq 0{,}95; \\ УКБ_{СУ}, \text{ если } 0{,}6 < КБ \leq 0{,}8; \\ УКБ_{УУ}, \text{ если } 0{,}3 < КБ \leq 0{,}6; \\ УКБ_{НУ}, \text{ если } 0 \leq КБ \leq 0{,}3. \end{cases} \quad (1)$$

где $УКБ_{ПУ}$ – превосходный уровень культуры безопасности;

$УКБ_{ВУ}$ – высокий уровень культуры безопасности;

$УКБ_{СУ}$ – средний уровень культуры безопасности;

$УКБ_{УУ}$ – умеренный уровень культуры безопасности;

$УКБ_{НУ}$ – низкий уровень культуры безопасности.

Принятые в ходе исследования границы уровня зрелости культуры безопасности были интерпретированы на основе комментариев экспертов. Это позволило получить выражение (1) для расчета уровня культуры безопасности УКБ в зависимости от показателя культуры безопасности КБ.

Обсуждение. Приведём характеристику каждого из предложенных уровней культуры безопасности, которая будет применяться при использовании разработанной методики:

Низкий (0-30%): руководители не вовлечены в процессы управления безопасностью труда, в следствии чего безопасность не является приоритетом и часто упускается из виду. Основное внимание уделяется производительности и быстрому выполнению работы, что часто приводит к несчастным случаям и травмам. Показатели безопасности не контролируются и не измеряются. Следование правилам и требованиям безопасности труда осуществляется из-за страха. О многих нарушениях и травмах не докладывают, а также присутствует тенденция скрывать случившиеся инциденты и несчастные случаи. Работники стараются быть не пойманными и безнаказанными.

Умеренный (31-60%): обеспечением безопасности занимаются только после возникновения инцидента, несчастного случая или аварии. Безопасность обеспечивается дисциплиной и страхом. Целью расследования несчастного случая является найти и наказать виновного, а не устранить системную причину. Основное внимание уделяется корректирующим действиям, а не предотвращению аварий и несчастных случаев. Функционирование системы управления охраны труда обеспечивается частично, большая часть её процедур осуществляются формально.

Средний (61-80%): безопасность рассматривается как приоритет и обеспечивается с помощью

политик и процедур. Основное внимание уделяется соблюдению требований и минимизации рисков, чтобы избежать юридических или финансовых последствий. Мониторинг сосредоточен в основном на статистике несчастных случаев. Часть работников вовлечены в обеспечение безопасности труда. О произошедших инцидентах сообщается, и они расследуется.

Высокий (81-95%): безопасность является приоритетом и интегрирована во все аспекты организации. Основное внимание уделяется предотвращению возникновения инцидентов, аварий и несчастных случаев. Сотрудники активно участвуют в совершенствовании безопасности труда. Мониторинг сосредоточен на превентивных, текущих и отстающих статистических данных. Анализ первопричин проводится для всех типов инцидентов.

Превосходный (96-100%): обеспечение безопасности труда является основной ценностью и является приоритетом номер один. Основное внимание уделяется постоянному совершенствованию и инновациям для повышения уровня культуры безопасности. Все сотрудники осознанно следуют правилам и требованиям безопасности труда, а также принимают активное участие в выявлении и решении проблем, связанных с обеспечением безопасности труда.

Приведенные характеристики уровней культуры безопасности, шкала (табл. 2) и выражение (1) могут быть использованы для качественной и количественной оценки уровня культуры безопасности. Учитывая экспертный консенсус и прозрачную процедуру обоснования, шкала (табл. 2) и выражение (1) могут быть рекомендованы к практическому применению в организациях с разной сферой экономической деятельности. Необходимо отметить, что для определения УКБ нужно рассчитать показатель КБ.

Выводы. Проведённое исследование позволило решить важную задачу – разработать количественную шкалу оценки уровня зрелости культуры безопасности. Полученная шкала охватывает весь диапазон возможных значений показателя культуры безопасности КБ и включает пять чётко разграниченных уровней: от низкого до превосходного. Применение метода Дельфи позволило получить приведённые выше результаты, а также исключить пересечения между уровнями, что делает предложенный инструмент удобным и прозрачным для практического применения.

Разработанная шкала оценки уровня культуры безопасности УКБ (табл. 2) и выражение (1) могут быть использованы специалистами по охране труда, аудиторами, руководителями подразделений и другими заинтересованными сторонами для диагностики текущего состояния культуры безопасности в организации. Чёткие числовые границы позволяют не только объективно оценить уровень зрелости культуры безопасности, но и определить направления для дальнейшего развития, поставить достижимые цели, выстроить план мероприятий по повышению культуры безопасности и отследить динамику изменений во времени. Это особенно важно в условиях внедрения риск-ориентированных подходов и стремления к непрерывному совершенствованию систем управления охраной труда и росту их эффективности.

Таким образом, результаты настоящего исследования направлены на повышение безопасности труда работников и могут быть рекомендованы к использованию в организациях различных отраслей независимо от их масштаба и степени зрелости культуры безопасности. Результаты работы являются шагом к стандартизации и систематизации процессов оценки культуры безопасности на количественном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Siuta D., Kukfisz B., Kuczyńska A., Mitkowski P.T. Methodology for the Determination of a Process Safety Culture Index and Safety Culture Maturity Level in Industries // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Vol. 19. – № 5. – P. 2668.

2. Iftadi I., Suhardi B., Pujianto E., Damayanti R.W. A bibliometric analysis on safety culture maturity model // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 465. – P. 02044.

3. Pei J., Liu L., Chi Y., Yu C. Research on the Maturity Evaluation Model of Enterprise Safety Culture // International journal of environmental research and public health. – 2023. – Vol. 20. – № 3. – C. 2664.

4. Лисицын, А.И. Культура безопасности в системе управления охраной труда / А.И. Лисицын // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 11. – С. 26-30.

5. Claxton G., Hosie P., Sharma P. Toward an effective occupational health and safety culture: A multiple stakeholder perspective // Journal of Safety Research. – 2022. – Vol. 82. – P. 57-67.

6. Naji G.M.A., Isha A.S.N., Mohyaldinn M.E., Leka S., Saleem M.S., Rahman S.M.N.B.S.A., Alzoraiki M. Impact of Safety Culture on Safety Performance; Mediating Role of Psychosocial Hazard: An Integrated Modelling Approach // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2021. – Vol. 18. – № 16. – P. 8568.

7. Berglund L. et al. Exploring safety culture research in the construction industry // Work. – 2023. – Vol. 76. – №. 2. – P. 549-560.

8. Van Nunen K., Reniers G., Ponnet K. Measuring safety culture using an integrative approach: The development of a comprehensive conceptual framework and an applied safety culture assessment instrument // International journal of environmental research and public health. – 2022. – Vol. 19. – № 20. – P. 13602.

9. Jasiulewicz-Kaczmarek M., Antosz K., Wyczółkowski R., Sławińska M. Integrated approach for safety culture factor evaluation from a sustainability perspective // International journal of environmental research and public health. – 2022. – Vol. 19. – № 19. – P. 11869.

10. Hafeez H., Abdullah M.I., Zaheer M.A., Ahsan Q. Organizational resilience process: integrated model of safety culture // Organization Management Journal. – 2022. – Vol. 19. – № 1. – P. 2-21.

11. Wen M., Gou Z., Xiong C., Wang Y., Cheng D. Research status and trends of enterprise safety culture: A knowledge graph analysis based on CiteSpace // Frontiers in public health. – 2024. – Vol. 12. – P. 1362830.

12. Amirah N.A., Him N.F.N., Rashid A., Rasheed R., Zaliha T.N., Afthanorhan A. Fostering a safety culture in manufacturing through safety behavior: A structural equation modelling approach // Journal of Safety and Sustainability. – 2024. – Vol. 1. – № 2. – P. 108-116.

13. Лыскова, И.Е. Основные направления формирова-

ния и развития культуры безопасности в Российской Федерации / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 2(39). – С. 84-100. – DOI 10.26583/gns-2021-02-09

14. Кулешов, В.В. Анализ влияния человеческого фактора и уровня культуры безопасности на производственный травматизм / В.В. Кулешов // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2024. – № 1. – С. 61-69. – DOI 10.25558/VOSTNII.2024.75.98.007.

15. Skulmoski G.J., Hartman F.T., Krahn J. The Delphi method for graduate research // Journal of Information Technology Education: Research. – 2007. – Vol. 6. – № 1. – P. 1-21.

16. Sourani A., Sohail M. The Delphi method: Review and use in construction management research // International journal of construction education and research. – 2015. – Vol. 11. – № 1. – P. 54-76.

Статья поступила в редакцию 02.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.45
EDN: YRZNVX

ДОБРОВОЛЬНАЯ СЕРТИФИКАЦИЯ В ОХРАНЕ ТРУДА: ИНСТИТУЦИОНАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ, МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ ВЫЗОВЫ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7715-2092
AuthorID: 359177
ORCID: 0000-0001-5654-4291
ResearcherID: AEK-5366-2022
ScopusID: 57201339759

КУЗНЕЦОВА Екатерина Анатольевна, кандидат социологических наук,
доцент кафедры Инженерной экологии и охраны труда
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, Россия, Москва, улица Красноказарменная, 14, строение 1, e-mail: kuznetsovayeka@mpei.ru)
ORCID: 0009-0007-7285-0791

МОЛЕБНОВ Георгий Владимирович, директор Департамента условий и охраны труда
Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации
(103132, Россия, Москва, улица Ильинка, 21, e-mail: MolebnovGV@gmail.com)

Аннотация. В статье представлен анализ международного и российского опыта добровольной сертификации в области охраны труда: рассмотрены существующие зарубежные и российские модели сертификации, их нормативно-правовая основа и эффективность с точки зрения управления охраной труда. Определены ключевые преимущества и ограничения, а также предложены возможные направления развития системы добровольной сертификации в России с учётом международных тенденций и национальных особенностей. Цель исследования – оценка целесообразности функционирования системы добровольной сертификации в России и определение перспективных направлений ее развития с учётом зарубежного опыта и национальных особенностей. Методы исследования включают сравнительный анализ международных и российских систем сертификации, а также оценку их нормативно-правовой основы. Результаты показывают, что добровольная сертификация способствует снижению профессиональных рисков, улучшению корпоративной культуры безопасности и повышению конкурентоспособности предприятий. Однако в России ее развитие сдерживается отсутствием единого реестра, технологическим разрывом и кадровым дефицитом. Предложены направления развития: создание национального реестра, интеграция с механизмами оценки рисков, партнёрства с крупными заказчиками и внедрение экономических стимулов. Эти меры могут способствовать адаптации лучших мировых практик к российским условиям, повышая безопасность труда и экономическую эффективность.

Ключевые слова: профессиональные риски, добровольная сертификация, система управления охраной труда, производственный травматизм, стандарты безопасности, международные практики, управление рисками.

VOLUNTARY CERTIFICATION IN OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH: INSTITUTIONAL EVOLUTION, INTERNATIONAL EXPERIENCE AND NATIONAL CHALLENGES

© The Author(s) 2025

KUZNETSOVA Ekaterina Anatolevna, candidate of sociological sciences,
associate professor of «Environmental Engineering and Occupational Safety»
National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
(111250, Russia, Moscow, street Krasnokazarmennaya 14, building 1, e-mail: kuznetsovayeka@mpei.ru)
MOLEBNOV Georgiy Vladimirovich, head of the Labour Conditions and Safety department
Ministry of Labour and Social Protection of the Russian Federation
(103132, Russia, Moscow, street Ilinka 21, e-mail: MolebnovGV@gmail.com)

Abstract. The article presents an analysis of international and Russian experience in voluntary certification in the field of occupational safety and health. It examines existing foreign and Russian certification models, their regulatory frameworks, and effectiveness in terms of occupational safety management. Key advantages and limitations are identified, and potential directions for the development of voluntary certification systems in Russia are proposed, taking into account international trends and national specificities. The aim of the study is to assess the feasibility of voluntary certification systems in Russia and determine promising development paths based on international experience and national conditions. Research methods include comparative analysis of international and Russian certification systems, as well as an evaluation of their regulatory foundations. The results demonstrate that voluntary certification contributes to the reduction of occupational risks, improvement of corporate safety culture, and increased competitiveness of enterprises. However, in Russia, its development is hindered by the lack of a unified registry, technological gaps, and a shortage of qualified personnel. Proposed development directions include creating a national registry, integrating risk assessment mechanisms, establishing partnerships with large clients, and introducing economic incentives. These measures could facilitate the adaptation of global best practices to Russian conditions, enhancing workplace safety and economic effi-

ciency.

Keywords: occupational risks, voluntary certification, occupational safety management system, occupational injuries, safety standards, international practices, risk assessment.

Для цитирования: *Кузнецова Е.А. Добровольная сертификация в охране труда: институциональная эволюция, международный опыт и национальные вызовы / Е.А. Кузнецова, Г.В. Молебнов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 138-144. – EDN: YRZNVX.*

Введение. Развитие системы управления охраной труда в современных экономических условиях приобретает стратегическое значение для обеспечения безопасности работников, повышения производительности и конкурентоспособности предприятий [1, 2]. В международной практике активно развиваются механизмы добровольной сертификации в области охраны труда, способствующие стандартизации процессов управления профессиональными рисками, формированию культуры безопасности и интеграции лучших мировых практик [3].

Ведущие международные системы, такие как ISO 45001 [4] в Евросоюзе, OSHA VPP [5] в США и другие, зарекомендовали себя как эффективные инструменты повышения безопасности и оптимизации затрат на охрану труда. Однако в России добровольная сертификация в области охраны труда пока не получила широкого распространения.

В современных условиях добровольная сертификация может стать важным элементом управления профессиональными рисками, а также механизмом, обеспечивающим интеграцию российских предприятий в глобальные рынки, где стандарты безопасности труда становятся важным критерием для партнёрства и инвестирования.

Поэтому основой целью исследования является оценка целесообразности функционирования системы добровольной сертификации в России и определение перспективных направлений развития добровольной сертификации с учётом зарубежного опыта и национальных особенностей.

Наиболее широкое распространение на международном уровне получил ISO 45001 [4] – международный стандарт для систем управления охраной труда, направленный на снижение рисков и создание безопасных условий труда. Он заменил устаревший OHSAS 18001 [6] и стал универсальным ориентиром для компаний. Стандарт включает требования к идентификации опасностей, управлению рисками, вовлечению сотрудников и постоянному улучшению процедур. Его структура совместима с другими стандартами ISO, такими как ISO 9001 (качество) и ISO 14001 (экология), что упрощает интеграцию.

В США используется стандарт ANSI/ASSE Z10 [7], акцентирующий внимание на управлении безопасностью как неотъемлемой части общего бизнеса и направлен на интеграцию безопасности труда в общий процесс управления предприятием. Стандарт включает в себя разделы по идентификации рисков, разработке и внедрению политики охраны труда, мониторингу результатов, оценке и планированию мероприятий по охране труда, а также постоянному улучшению процедур системы управления охраной труда на основании результатов мониторинга. Особенностью стандарта является высокая степень детализации требований, что с одной стороны позволяет повысить эффективность стратегического управления предприятием, а с другой ограничивает международную применимость.

На основании этого стандарта реализуется программа Voluntary Protection Programs (VPP), администрируемая Управлением по охране труда (OSHA), которая представляет собой одну из наиболее известных сертификационных программ для организаций, демонстрирующих высокий уровень приверженности охране труда. Компании-участники VPP демонстрируют статистически значимое снижение уровня производственного травматизма по сравнению с национальными средними показателями [5]. Согласно отчету National Safety Council [8], сертифицированные предприятия сообщают о 50%-м снижении случаев травматизма, что подтверждает эффективность программы. Однако эксперты указывают, что высокая стоимость участия и необходимость значительных организационных изменений ограничивают доступность программы для малых предприятий [9].

BS OHSAS 18001 [6] (Великобритания) был международным эталоном в области управления охраной труда до появления ISO 45001 [4]. Этот стандарт включал управление рисками, идентификацию опасностей, планирование мероприятий и контроль их выполнения. Организации проходили регулярные аудиты, которые обеспечивали соответствие процедур. Основной упор делался на снижение травматизма, на оценку и управлении производственными рисками, на аудит процессов и внедрение корректирующих мер. Принципы, отраженные в данном стандарте, получили свое развитие в стандарте ISO 45001 [4].

В Азии действуют различные программы добровольной сертификации, ориентированные как на безопасность продукции, так и на сертификацию систем управления охраной труда.

Корейское агентство по безопасности и гигиене труда (KOSHA) администрирует S Mark, представляющий собой добровольную сертификацию безопасности продукции [10]. Однако системных данных о влиянии сертификации S Mark на снижение уровня травматизма пока недостаточно.

Национальный стандарт GB/T 45001-2020 [11],

являющийся эквивалентом ISO 45001, регулирует внедрение систем управления охраной труда в Китае. Согласно отчету China National Institute of Standardization, компании, внедрившие GB/T 45001, демонстрируют улучшенные показатели управления рисками.

Стандарт SS 651 [12], разработанный в Сингапуре с учетом ISO 45001, ориентирован на химическую промышленность и интегрирует цифровые технологии для оценки рисков. Доступность данных о влиянии SS 651 на показатели травматизма пока ограничена.

В Чили разработана система Seguridad y Salud en el Trabajo Chile (SST-CL), которая сочетает международные стандарты ISO 45001 с национальными нормативными требованиями. В исследовании Лиз Фонсека и Педро Кампос [13] анализируется эффективность SST-CL в горнодобывающем секторе, где отмечено снижение травматизма на 35%. Однако отсутствие унифицированных механизмов контроля внедрения остается значительной проблемой.

В африканских странах добровольная сертификация охраны труда находится на начальном этапе развития. В Нигерии действует Nigeria Occupational Safety and Health Association (NOSHSA), однако уровень внедрения её стандартов остается низким, охватывая лишь 12% зарегистрированных предприятий [14]. Основными барьерами являются недостаточная осведомленность бизнеса и ограниченный доступ к ресурсам для внедрения стандартов.

Анализ российских исследований в области добровольной сертификации охраны труда указывает на существование ряда системных ограничений, влияющих на её развитие. В исследовании В.А. Тумакова и др. [15] выявлено, что добровольная сертификация развивается неравномерно, демонстрируя значительные успехи в сфере пожарной безопасности, но отставая в охране труда промышленных предприятий. Согласно К.С. Вегеле [16], отсутствие единого реестра сертифицированных организаций приводит к снижению доверия к системе, поскольку потенциальные участники рынка не обладают достаточной информацией о доступных сертификационных механизмах.

Другим ключевым ограничением является технологический разрыв. С.В. Федосеев [17] отмечает, что цифровизация процедур, таких как онлайн-аудит, сталкивается с низкой готовностью малого бизнеса к инновациям. Недостаток отечественных решений для испытаний и анализа профессиональных рисков замедляет процесс импортозамещения, что подтверждается данными анализа систем сертификации в центрах обработки данных. В то же время исследование Е.М. Шастиной и В.М. Гулина [18] показывает, что кадровый дефицит остается серьезным ограничением: число сертифицированных экспертов по всей стране составляет менее 500 человек, а 70% из них сосредоточены в Москве и Санкт-Петербурге, что создаёт региональный дисбаланс в доступе к сертификационным услугам.

Для преодоления данных ограничений исследователи предлагают ряд направлений реформирования системы сертификации. В.А. Тумаков и др. [15] указывают на необходимость создания межведомственной платформы для координации сертификации, объединяющей усилия таких структур, как МЧС России, Минтруд России, Ростехнадзор и Роспотребнадзор. К.С. Вегеле [16] отмечает, что введение налоговых льгот для предприятий, внедряющих стандарты ГОСТ Р ИСО 45001, может стимулировать повышение уровня охраны труда. В свою очередь, С.В. Федосеев [17] подчеркивает значимость образовательных инициатив, направленных на подготовку экспертов по сертификации в ведущих российских вузах, что позволит устранить кадровый дефицит и обеспечить равномерное распределение специалистов по регионам.

Синтез проведённых исследований подтверждает наличие системных противоречий, замедляющих распространение добровольной сертификации в России. Е.М. Шастина и В.М. Гулин [18] акцентируют внимание на отраслевой фрагментации: в то время как строительная отрасль и пожарная безопасность демонстрируют положительную динамику внедрения добровольных стандартов, сферы информационных технологий и промышленного производства остаются в зоне значительного отставания. Кроме того, согласно их анализу, институциональные барьеры, включая монополизацию рынка сертификации и несовершенство нормативной базы, ограничивают вовлечённость бизнеса. Экономические аспекты, такие как высокие затраты на сертификацию для малых предприятий и отсутствие субсидий на региональном уровне, снижают их мотивацию к участию в сертификационных процедурах.

Методология. Цель исследования – оценка целесообразности функционирования системы добровольной сертификации в России и определение перспективных направлений ее развития с учётом зарубежного опыта и национальных особенностей.

Данное исследование основано на теоретическом подходе и использует комплексный набор методов для анализа добровольной сертификации в области охраны труда.

Проведено детальное изучение международных стандартов и национальных систем сертификации, среди которых: ISO 45001 (международный), ANSI/ASSE Z10 (США), BS OHSAS 18001 (Великобритания), KOSHA 18001 (Южная Корея), GB/T 45001-2020 (Китай), SS 651 (Сингапур) SST-CL (Чили).

Осуществлен сравнительный анализ и сопоставление процедур, возможностей и форм подтверждения соответствия различных систем сертификации, которое охватывало:

– Процедуры: идентификация опасностей, управление рисками, планирование мероприятий, мониторинг и улучшение процессов.

– Возможности: интеграция с другими стандартами (например, ISO 9001), применимость к разным отраслям, доступность для малого бизнеса.

– Подтверждение соответствия: аудит аккредитованными органами, внутренние проверки, сертификационные программы (например, OSHA VPP).

Причем, особое внимание уделено различиям между международными и российскими подходами, включая уровень цифровизации и институциональную поддержку.

Методологические аспекты, использованные в исследовании, базируются на системном подходе к стандартизации и включали сбор данных из официальных источников и научных баз, классификацию данных по регионам (Европа, США, Азия, Россия), типам систем (международные, национальные) и отраслям (промышленность, строительство, пожарная безопасность) и интеграцию результатов анализа для формирования рекомендаций. В частности, для анализа международного опыта изучены как количественные данные (например, снижение травматизма), так и качественные показатели (репутационные выгоды, корпоративная культура). В российском контексте акцент сделан на институциональных и технологических ограничениях, таких как отсутствие реестра и кадровый дефицит. Надежность выводов обеспечена использованием проверенных источников и кросс-проверкой данных.

Результаты. Стандарты ISO 45001 [4], ANSI/ASSE Z10 [7] и национальные системы, такие как KOSHA 18001 [10], показали, что унифицированные подходы к управлению безопасностью значительно снижают риски и улучшают условия труда. Их внедрение на уровне международных блоков доказало свою эффективность в создании гармонизированного подхода к безопасности труда. В таблице 1 представлен обзорный анализ наиболее распространенных международных систем сертификации СУОТ.

*Таблица 1 – Сравнительный анализ международных систем сертификации систем управления охраной труда**

Система сертификации СУОТ	Основные процедуры	Возможности	Форма подтверждения соответствия
ISO 45001 [4]	– идентификация опасностей – управление рисками – вовлечение сотрудников – постоянное улучшение процедур	простота интеграции в систему управления организацией, так как структура совместима с другими стандартами ISO, такими как ISO 9001 (качество) и ISO 14001 (экология)	аудит аккредитованными организациями (органами по сертификации)
ANSI/ASSE Z10 (США) [7]	– идентификация рисков – разработка и внедрение политики охраны труда – мониторинг результатов, оценка и планирование мероприятий по охране труда – постоянное улучшение процедур	высокая степень детализации требований ограничивает международную применимость	
BS OHSAS 18001 (Великобритания) [6]	– управление рисками – идентификация опасностей – планирование мероприятий и контроль их выполнения	значительный опыт использования OHSAS 18001 при разработке национальных и локальных стандартов	

* *составлено авторами*

Анализ международного опыта добровольной сертификации в области охраны труда демонстрирует, что, несмотря на ограниченность количественных данных о её влиянии на уровень травматизма, существует ряд следующих косвенных признаков, указывающих на её эффективность:

1. Снижение операционных и репутационных рисков. Организации, внедрившие сертификационные стандарты, демонстрируют более высокий уровень соответствия требованиям законодательства, что позволяет минимизировать вероятность наложения штрафов и административных санкций. Улучшенная репутация таких компаний на рынке повышает их конкурентоспособность и привлекает клиентов, инвесторов и поставщиков, ориентированных на соблюдение норм ESG (экологическое, социальное и корпоративное управление).

2. Повышение осведомленности о рисках и улучшение корпоративной культуры безопасности. Внедрение добровольных стандартов предполагает обучение сотрудников, внедрение механизмов самоконтроля и создание системы внутреннего мониторинга рисков. По данным EU-OSHA и OSHA [19], предприятия, применяющие инструменты сертификации, демонстрируют повышение вовлеченности персонала в процессы обеспечения безопасности. Этот эффект особенно заметен в странах, где культура охраны труда ранее не была приоритетной.

3. Экономическая эффективность и снижение непроизводительных затрат. Компании, внедрившие системы менеджмента безопасности труда, как правило, демонстрируют снижение потерь, связанных с временной нетрудоспособностью сотрудников, перераспределением рабочих обязанностей в случае производственного травматизма, а также с простоем оборудования из-за инцидентов. Это особенно актуально для промышленных секторов, где высокий уровень травматизма напрямую

отражается на операционной эффективности.

4. Интеграция сертификационных требований в международные и национальные регуляторные системы. Такие программы, как GB/T 45001 [11] в Китае или SST-CL [13] в Чили, адаптируют международные стандарты к локальным условиям, что позволяет не только гармонизировать требования к охране труда, но и снижать барьеры при выходе национальных компаний на международные рынки.

5. Развитие технологических и цифровых решений. Современные системы сертификации всё чаще интегрируют цифровые технологии для анализа и прогнозирования рисков (например, платформа SafetyConnect в Сингапуре). Это способствует формированию проактивного подхода к охране труда, переходу от реактивного устранения последствий к предупреждению инцидентов. Цифровизация сертификационных процессов также делает их более доступными и снижает административные барьеры.

Таким образом, несмотря на отсутствие исчерпывающей статистики, эффективность добровольной сертификации в области охраны труда подтверждается косвенными факторами, включая:

– улучшение корпоративной культуры безопасности;

– снижение операционных рисков;

– повышение экономической устойчивости компаний;

– интеграцию стандартов в национальное регулирование и развитие цифровых решений.

Это делает добровольную сертификацию важным инструментом повышения безопасности на производстве, который необходимо учитывать при разработке национальных стратегий в области охраны труда.

Перспективы дальнейшего развития добровольной сертификации охраны труда в России связаны с решением следующих задач:

– разработка отраслевых стандартов, учитывающих специфику ключевых секторов, таких как промышленные предприятия, центры обработки данных и строительство, позволит адаптировать сертификацию к потребностям реальной экономики [17];

– введение межведомственной платформы для координации деятельности по сертификации всех участников процесса обеспечит унификацию требований и снижение административной нагрузки [15];

– внедрение так называемой «гибкой сертификации», включающей упрощённые схемы для малого бизнеса и налоговые льготы, может стать важным стимулом для роста сертификационной активности [16].

Обобщённый анализ российских исследований демонстрирует, что добровольная сертификация в России сталкивается с рядом системных противоречий. При разработке новых механизмов добровольной сертификации необходимо учитывать международный опыт, адаптируя его к российским условиям [18]. Особую роль играет учёт региональных различий и необходимость импортозамещения, что требует создания независимой национальной системы подтверждения соответствия. В целом, выявленные структурные противоречия и стратегические ориентиры могут стать основой для построения комплексной модели интеграции добровольной сертификации в систему государственного регулирования охраны труда.

Обсуждение. Результаты оценки международного опыта показывают, что добровольная сертификация эффективно снижает профессиональные риски и укрепляет культуру безопасности при наличии стимулов [19, 20]. В отличие от США и ЕС, где применяются налоговые льготы и скидки на страхование [8], в России их отсутствие снижает привлекательность сертификации [16]. Анализ текущего состояния российского рынка добровольной сертификации показывает, что он находится на этапе формирования и характеризуется неоднородностью в восприятии данной инициативы разными категориями бизнеса. Крупные промышленные предприятия с высоким уровнем корпоративного управления уже демонстрируют интерес к добровольной сертификации, рассматривая её как инструмент управления рисками, повышения репутации и снижения затрат, связанных с производственным травматизмом. В таких отраслях, как нефтегазовая, строительная и металлургическая, сертификация по стандартам охраны труда всё чаще становится требованием заказчиков при выборе подрядчиков, что создает естественный стимул для сертификации.

Дополнительным фактором является государственная политика, направленная на развитие механизмов саморегулирования и внедрение добровольных стандартов безопасности. Программы Роструда, Социального фонда России и Минтруда России предусматривают развитие инструментов оценки профессиональных рисков, что в перспективе может быть интегрировано с системой страховых тарифов, формируя дополнительные стимулы для сертифицированных компаний.

Однако, несмотря на положительные тенденции, на пути распространения добровольной сертификации сохраняются значительные барьеры. Малый и средний бизнес, который составляет значительную часть рынка труда в России, пока не видит очевидных экономических преимуществ сертификации. Для многих промышленных предприятий сертификация остаётся затратной процедурой, не обеспечивающей прямой выгоды в краткосрочной перспективе. В условиях ограниченных ресурсов компании чаще ориентируются на выполнение обязательных требований, а не на инициативное внедрение дополнительных стандартов. В таблице 2 приведен анализ зарубежного опыта экономического стимулирования малого бизнеса к сертификации систем управления охраной труда.

*Таблица 2 – Стимулы сертификации в разных странах**

Страна	Снижение штрафов	Налоговые льготы	Снижение страховых тарифов	Стимулы для малого бизнеса
США	Да	Да	Да	Ограниченные
Великобритания	Да	Частично	Частично	Средние
Германия	Да	Да	Да	Высокие
Франция	Да	Да	Частично	Средние
Китай	Нет	Частично	Нет	Нет
Россия	Частично	Нет	Нет	Нет

** составлено авторами*

Дополнительным сдерживающим фактором является низкий уровень осведомлённости о добровольной сертификации. В отличие от международных рынков, где сертификация интегрирована в бизнес-процессы и оказывает влияние на доступ к финансовым ресурсам, государственным контрактам и партнёрствам, в России её возможности пока недостаточно реализованы.

Таким образом, успешное внедрение добровольной сертификации в России требует создания дополнительных стимулов, усиления информационной поддержки и упрощения процедур сертификации. Международный опыт показывает, что добровольная сертификация становится эффективным инструментом только тогда, когда она сопровождается экономическими и регуляторными стимулами.

Одним из ключевых факторов является экономическая выгода. В международной практике сертифицированные компании получают налоговые послабления, снижение страховых тарифов и преференции при участии в тендерах (HSE UK, 2023) [20]. Аналогичные механизмы могли бы быть внедрены и в России, что сделало бы сертификацию привлекательной как для крупных корпораций, так и для среднего бизнеса.

Дополнительным преимуществом может стать снижение административной нагрузки со стороны контролирующих органов. Включение сертифицированных компаний в реестр «наилучших практик» и предоставление им преференций при проверках может мотивировать организации к прохождению сертификации. Аналогичные меры действуют в Германии и Франции, где предприятия с сертифицированными системами охраны труда реже подвергаются проверкам и получают налоговые льготы (EU-OSHA, 2022) [19].

Имиджевая составляющая сертификации также играет значительную роль. В нефтегазовом, строительном и машиностроительном секторах сертификация становится маркером качества, что облегчает участие компаний в крупных тендерах и создаёт новые возможности для партнёрств. Формирование единого национального реестра сертифицированных организаций может повысить доверие к добровольной сертификации и увеличить её востребованность среди участников рынка.

Не менее важным аспектом является упрощение процедур сертификации. В странах Евросоюза применяются механизмы ступенчатой сертификации, когда предприятия могут пройти базовую сертификацию с минимальными затратами, а затем перейти к более строгим стандартам. В России подобный подход мог бы позволить малому бизнесу постепенно адаптироваться к стандартам сертификации, снижая входной барьер и делая процесс более доступным.

Развитие добровольной сертификации, в свою очередь, требует комплексных мер, направленных на интеграцию системы в национальные экономические и регуляторные процессы. Опыт зарубежных стран демонстрирует, что добровольная сертификация не может существовать изолированно – её эффективность обеспечивается через систему финансовых и административных стимулов.

Одним из ключевых направлений является создание национального реестра сертифицированных компаний и экспертов. Это повысит прозрачность системы, обеспечит доверие к добровольной сертификации и позволит бизнесу учитывать наличие сертификации при выборе партнёров и поставщиков. Подобные реестры активно применяются в Европе и Северной Америке, повышая уровень доверия к сертифицированным организациям.

Дополнительно важным шагом станет интеграция сертификации с механизмами оценки профессиональных рисков. В ряде стран страховые компании предоставляют скидки на страховые взносы предприятиям, сертифицированным по добровольным стандартам безопасности. Этот подход можно адаптировать в России, включив сертификацию в перечень рекомендованных мероприятий для страховых льгот.

Развитие партнёрств с крупными корпоративными заказчиками также является перспективным направлением. Включение сертификационных требований в корпоративные стандарты ведущих компаний стимулирует рост спроса на сертификацию. Например, в нефтегазовом секторе наличие добровольной сертификации может стать обязательным критерием при выборе подрядчиков.

Для эффективного развития добровольной сертификации в России также целесообразно адаптировать подходы к сертификационным процеду-

рам. Развитие различных уровней сертификации – базового, расширенного и корпоративного – позволит адаптировать процесс для предприятий разного масштаба и снизить административные барьеры.

Наконец, необходимо активное продвижение добровольной сертификации через отраслевые мероприятия, образовательные программы и государственные инициативы. Создание информационных кампаний и программ обучения позволит изменить восприятие сертификации как формальной процедуры и превратить её в инструмент роста и конкурентного преимущества.

Таким образом, развитие добровольной сертификации в России возможно при системном подходе, сочетающем экономические стимулы, регуляторные послабления и активную популяризацию её преимуществ среди бизнеса.

Выводы. В ходе исследования установлено, что в странах с развитой системой охраны труда добровольная сертификация эффективно дополняет государственное регулирование, способствует снижению уровня производственного травматизма и повышает инвестиционную привлекательность предприятий. Однако её эффективность зависит от наличия экономических стимулов, интеграции с национальными нормативными требованиями и степени вовлечённости профессионального сообщества.

К перспективным направлениям развития добровольной сертификации в России по результатам исследования отнесены:

– формирование национального реестра сертифицированных организаций и экспертов;

– интеграция добровольной сертификации с механизмами оценки профессиональных рисков;

– развитие партнёрств с крупными заказчиками;

– создание гибких моделей сертификации и внедрение экономических стимулов в виде налоговых льгот и субсидий.

Таким образом, добровольная сертификация в области охраны труда представляет собой перспективный инструмент управления профессиональными рисками, который при эффективной адаптации может стать важным элементом национальной системы охраны труда. Сочетание международных практик с учетом российской специфики позволит создать устойчивую, прозрачную и востребованную систему добровольной сертификации, обеспечивающую баланс интересов бизнеса, государства и общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Maryam Lari A longitudinal study on the impact of occupational health and safety practices on employee productivity // Safety Science, Volume 170, 2024, 106374. doi: 10.1016/j.ssci.2023.106374.

2. Kineber AF, Antwi-Afari MF, Elghaish F, Zamil AMA, Alhusban M, Qaralleh TJO. Benefits of Implementing Occupational Health and Safety Management Systems for the Sustainable Construction Industry: A Systematic Literature Review. Sustainability. 2023; 15(17):12697. doi: 10.3390/su151712697.

3. Lloyd's Register Foundation, "World Risk Poll 2024 Report: Engineering Safer Workplaces Global Trends in Occupational Safety and Health," Lloyd's Register Foundation, 2024. doi: 10.60743/X8MD-V972

4. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use.

5. OSHA. Voluntary Protection Programs (VPP) – Occupational Safety and Health Administration.

6. OHSAS 18001:2007. Occupational health and safety management systems – Requirements.

7. ANSI/ASSE Z10-2012 (R2017) Occupational Health and Safety Management Systems.

8. National Safety Council (NSC). Workplace Injury and Fatality Trends 2022.

9. Lynch, R. (2022). OSHA VPP: Accessibility for Small Businesses. Journal of Safety Research, 55, 112-120. doi: 10.1016/j.jsr.2022.02.004.

10. KOSHA. South Korea's S Mark Safety Certification System.

11. China National Institute of Standardization (CNIS). GB/T 45001-2020: Occupational Health and Safety Management System.

12. TÜV SÜD. Singapore SS 651: Safety and Health Management for Chemical Industry.

13. Fonseca, L., Campos, P. (2020). Voluntary vs. Mandatory Safety Standards: A Case Study from Chile. Safety Science, 132, 104956. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104956.

14. Adeyemi, O. (2023). Occupational Safety in Nigeria: Barriers to Voluntary Certification. African Journal of Management, 11(2), 89–104. DOI: 10.1080/10803548.2023.1912560.

15. Тумаков В.А., Ткаченко Е.Н., Утюгова Н.А., Селезнева Я.И. Результаты деятельности по подтверждению соответствия продукции обязательным требованиям пожарной безопасности за 2023 год // Актуальные вопросы пожарной безопасности. – 2024. – № 1 (19). – С.38-43.

16. Вегеле К.С. СРО в области охраны труда как мера контроля выполнения мероприятий по охране труда в строительных организациях // Столыпинский вестник. – 2023. – № 1. – С. 414-430.

17. Федосеев С.В. Сертификация центров обработки данных: нормативно-правовые и технические аспекты // Правовая информатика. – 2023. – № 2. – С. 14-23.

18. Шастина Е.М., Гулин В.М. Совершенствование системы подтверждения соответствия РФ на основе бенчмаркинга систем России и США // Теоретическая экономика. – 2023. – №8. – С. 63-75.

19. EU-OSHA (2022). European Agency for Safety and Health at Work.

20. HSE UK (2023). Five Steps to Risk Assessment.

Статья поступила в редакцию 16.06.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 372.881.1
EDN: XBMWJF

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА И ФАКТОРОВ РИСКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ УЧЕБНОЙ И ВНЕУЧЕБНОЙ ЗАНЯТОСТИ СТУДЕНТОВ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7194-0598
AuthorID: 633435
ORCID: 0000-0001-5839-8945
ResearcherID: F-1598-2019
ScopusID: 57201060164

КЛИМОВА Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент,
заведующая кафедрой «Экологии и природоохранной деятельности»
Российский государственный социальный университет
(129226, Россия, Москва, улица Вильгельма Пика, дом 4, стр. 1, e-mail: klimovaev@rgsu.net)

SPIN: 4768-3762
AuthorID: 632808
ORCID: 0000-0001-7858-143X
ResearcherID: Q-2218-2017
ScopusID: 57201063357

СЕМЕЙКИН Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент,
врио заведующего кафедрой «Безопасности жизнедеятельности»
Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова
(308012, Россия, Белгород, улица Костюкова, дом 46, e-mail: semeykin.ay@bstu.ru)

SPIN: 6880-2157
AuthorID: 1085774
ORCID: 0009-0001-6612-3762
ResearcherID: MIP-4903-2025
ScopusID: 56426849500

ЧЕРКАСОВ Роман Андреевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасности жизнедеятельности»
Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова
(308012, Россия, Белгород, улица Костюкова, дом 46, e-mail: cherkasov.ra@bstu.ru)

SPIN: 2361-2396
AuthorID: 1069311
ORCID: 0000-0002-0245-9478
ResearcherID: JXY-5982-2024
ScopusID: 58112178800

ПЕТРОВА Виктория Александровна, ассистент кафедры «Безопасности жизнедеятельности»
Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова
(308012, Россия, Белгород, улица Костюкова, дом 46, e-mail: lezhand@mail.ru)

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема производственного травматизма среди студентов, обусловленная совмещением учебной деятельности с трудовой деятельностью различного характера: прохождение производственной практики, участие в студенческих отрядах и трудоустройство в свободное от учебы время. Исследование основано на анализе данных анкетирования студентов старших курсов ВУЗа, направленного на выявление основных причин травматизма и оценку уровня осведомленности в вопросах охраны труда. Для обработки полученных данных использован метод оценок по обобщенной функции желательности Харрингтона, позволяющий получить интегральный показатель, отражающий состояние производственного травматизма в студенческой среде. Установлено, что низкий уровень знаний в области охраны труда и недостаточная эффективность системы управления охраной труда в вузах являются ключевыми факторами, повышающими риск производственного травматизма. На основе анализа выявлены наиболее уязвимые аспекты системы обеспечения безопасности труда студентов. В работе представлены практические рекомендации, направленные на повышение уровня соблюдения требований охраны труда, снижение риска получения травм и улучшение информированности студентов о мерах безопасности. Результаты исследования могут быть использованы для разработки и внедрения эффективных программ профилактики производственного травматизма в вузах, а также для совершенствования системы управления охраной труда в организациях, привлекающих к работе студентов. Предложенные меры способствуют созданию безопасных условий труда для студентов и сохранению их здоровья и жизни, что является важным фактором успешной реализации образовательных и профессиональных планов.

Ключевые слова: студенты, охрана труда, производственный травматизм, результативность, эффективность, показатель результативности, обобщенный показатель желательности, функция Харрингтона.

ANALYSIS OF THE CAUSES OF OCCUPATIONAL INJURIES AND RISK FACTORS FOR DIFFERENT TYPES OF STUDENTS' ACADEMIC AND EXTRACURRICULAR EMPLOYMENT

© The Author(s) 2025

KLIMOVA Elena Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor,
head of the Department of «Ecology and Environmental Protection»
Russian State Social University
(129226, Russia, Moscow, Wilhelm Pika Street 4, building 1, e-mail: klimovaev@rgsu.net)
SEMEIKIN Alexander Yuryevich, candidate of technical sciences, associate professor,
acting head of the Department of «Life Safety»
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russia, Belgorod, Kostyukova street, 46, e-mail: semeykin.ay@bstu.ru)
CHERKASOV Roman Andreevich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of «Life Safety»
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russia, Belgorod, Kostyukova street, 46, e-mail: cherkasov.ra@bstu.ru)
PETROVA Victoria Aleksandrovna, assistant of the Department of «Life Safety»
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
(308012, Russia, Belgorod, Kostyukova street, 46, e-mail: lezhand@mail.ru)

Abstract. This paper examines the problem of industrial injuries among students, caused by the combination of educational activities with work activities of various types: practical training, participation in student teams and employment in their free time from study. The study is based on the analysis of data from a survey of senior university students aimed at identifying the main causes of injuries and assessing the level of awareness of occupational safety issues. To process the obtained data, the estimation method using Harrington's generalized desirability function was used, which allows us to obtain an integral indicator reflecting the state of occupational injuries in the student environment. It has been established that a low level of knowledge in the field of occupational safety and insufficient efficiency of the occupational safety management system in universities are key factors that increase the risk of occupational injuries. Based on the analysis, the most vulnerable aspects of the student labor safety system were identified. The paper presents practical recommendations aimed at increasing the level of compliance with occupational safety requirements, reducing the risk of injury and improving students' awareness of safety measures. The results of the study can be used to develop and implement effective programs for the prevention of occupational injuries in universities, as well as to improve the occupational safety management system in organizations that employ students. The proposed measures help create safe working conditions for students and save their health and life, which is an important factor in the successful implementation of educational and professional plans.

Keywords: students, occupational safety, occupational injuries, resultativity, efficiency, performance indicator, generalized desirability indicator, Harrington function.

Для цитирования: *Климова Е.В. Анализ причин производственного травматизма и факторов риска при различных типах учебной и внеучебной занятости студентов / Е.В. Климова, А.Ю. Семейкин, Р.А. Черкасов, В.А. Петрова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 145-152. – EDN: XBMWJF.*

Введение. Уровень производственного травматизма в Российской Федерации демонстрирует тенденцию к снижению, однако остается на высоком уровне. Согласно официальной статистике, ежегодно в России более 20 тысяч работников получают травмы на рабочих местах, из которых свыше 1,5 тысяч случаев заканчиваются летальным исходом [4]. Возраст пострадавших варьируется от 18 до 75 лет. Анализ возрастной структуры пострадавших показывает, что до 5% от общего числа инцидентов приходится на работников в возрасте до 25 лет, обладающих стажем работы менее одного года [1-5]. В указанную возрастную категорию входят также студенты высших и средне специальных учебных заведений, которые совмещают обучение с трудовой деятельностью. Вероятно, основной причиной по которой обучающиеся стремятся объединять получение знаний в образовательных учреждениях с работой в различных организациях, являются их финансовые трудности, но помимо этого не мало важным фактором остаётся приобретение практического опыта, который может им пригодиться в будущем.

Также следует сказать, что некоторые студенты в основном на старших курсах занимаются научно-исследовательской работой и педагогической деятельностью в качестве ассистентов кафедры, для того чтобы в дальнейшем продолжить своё обучение в магистратуре и аспирантуре. Однако официальная статистика не отражает реальную

картину производственного травматизма среди студентов, поскольку по различным причинам случаи травмирования не всегда фиксируются и расследуются надзорными органами, которые контролируют данный процесс.

Проблема производственного студенческого травматизма практически не поднимается у нас в обществе. В большинстве научных работ анализируется травматизм студентов на занятиях физической культуры, студентов-спортсменов (во время тренировок по разным видам спорта и соревнований), при участии студентов в технических соревнованиях (аварии в болидах «Формула студент»), и т.д. [2-13]. Однако за последние 5 лет участились случаи травмирования и гибели студентов в период их трудовой деятельности, не связанной с процессом обучения. Так, в 2020 году в Белгороде произошли несколько групповых несчастных случаев, в которых пострадавшими оказались молодые работники 16, 17 и 18 лет (падение с высоты, один погибший), один смертельный случай (погибший студент университета подрабатывал на строительной площадке). В 2021, 2023 годах в России также зафиксированы несчастные случаи с участием студентов [13-21].

Безусловно, основная цель студента – получение знаний, умений, навыков в рамках осваиваемой образовательной программы то, что важно в первую очередь. Но, как показывает статистика, студенты старших курсов находят возможность работать в свободное от учебы время, так как уже имеют приобретённый для этих целей необходимый опыт, по сравнению с младшими курсами. По результатам исследований, проведенных учеными НИУ ВШЭ [4], около половины опрошенных студентов впервые устраиваются на работу уже на первом или втором курсе бакалавриата по разным на то причинам, 65 % старшекурсников имеют опыт совмещения учебы и работы (рис. 1, 2). При этом данных по производственному травматизму студентов практически нет, т.к. в статистике они учитываются как работники соответствующих организаций различных видов экономической деятельности.

Кроме того, в последнее время получили широкое развитие и студенческие строительные отряды, где студент имеет возможность самостоятельно погрузиться в реальные производственные условия – столкнуться с реальными вредными факторами, а также с различными опасностями, сопряжёнными с производством, влияющие на его состояние здоровья. Помимо этого, практиканту необходимо учиться применять соответствующие навыки, полученные им в период образовательного процесса, с целью ограждения себя и своих коллег от опасности в случае её внезапного возникновения.

Высшие образовательные учреждения так же лишены статистики о травматизме и несчастных случаях среди обучающихся как старших, так и младших курсов (помимо спортивных и медицинских ВУЗов) во время их процесса обучения а также прохождения и сдачи учебной практики, но большим плюсом является организация строгого контроля за учётом пропусков посещений студентами занятий [4, 5].

Рисунок 1 – Этап обучения в вузе, на котором студенты впервые устраиваются на работу (по данным НИУ ВШЭ)

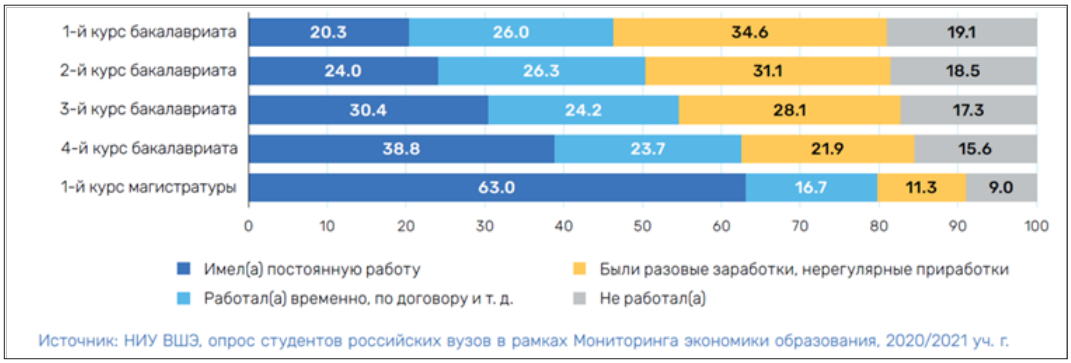


Рисунок 2 – Совмещение студентами учебы и работы по типам и годам обучения (по данным НИУ ВШЭ)

В связи с этим необходимо четкое понятие причин производственного травматизма, внедрение мероприятий по профилактике производственного травматизма среди студентов для повышения их уровня образования в сфере безопасности и знания своих прав, не менее важна поддержка со стороны государства по программам укрепления и сохранения здорового образа жизни молодёжи и формирования правильных направлений для развития. Необходимо как можно больше разрабатывать и реализовывать методов по охране труда обучающихся на всех основных этапах их становления и развития в данной направленности [5, 6].

Ключевой фактор, повышающий риск несчастных случаев среди молодых работников (включая студентов, практикантов и членов студенческих строительных отрядов), – недостаточный уровень знаний в сфере охраны труда на предприятии, который подлежит периодической проверке и в следствии этого имеют место некоторые пробелы в культуре безопасности, которую необходимо улучшать и развивать. Из-за чего, наша научная работа преследовала цель оценить уровень знаний студентов определённых направлений по охране труда и в тоже самое время актуальных для различных сфер профессиональной деятельности.

Методология. Основной целью исследования являлось подтверждение гипотезы о том, что низкий уровень знаний студентов по вопросам охраны труда и несовершенство системы управления охраной труда у работодателя оказывают значительное влияние на вероятность травматизма среди студентов во время постоянного или временного трудоустройства (а также во время практик и работы в студенческих отрядах). В качестве методов исследования были определены – анкетирование, математическая обработка результатов анкетирования: подсчет критериев значимости различий, факторный или кластерный анализ.

Проведено анкетирование более 300 студентов двух университетов РГСУ и БГТУ им. В.Г. Шухова направлений подготовки 08.03.02 «Строительство», 20.03.01 «Техносферная безопасность» и других. Целью анкетирования стало установление основных видов занятости студентов, наличия опыта работы по специальности и не связанной со специальностью, а также уровня владения студентов основами охраны труда и проверки знаний в данной области. На основе данных анкетирования определялся обобщенный показатель уровня обеспечения охраны труда студентов при различных видах трудовой деятельности.

Оценка эффективности системы управления охраной труда – это многофакторный анализ с множеством решений, подразумевающих собой мульти вариативность. В качестве метода, позволявшего нам выполнить данный анализ, выступила обобщенная функция желательности Харрингтона, которой присуще такие свойства, как монотонность, непрерывность и гладкость.

Способ оценки по обобщенной функции Харрингтона – получение общего показателя, вместо обычного процесса сравнения различных показателей, характеристикой которых выступает эффективность и результативность разного рода процессов [7]. Различные индикаторы определяют наличие отличий между разными группами в абсолютной степени по определенным показателям.

Затем в работе был построен пересчет действительных показателей результативности и эффективности деятельности (ПРЭД) в области охраны труда посредством использования «кривой желательности» Харрингтона. Конкретные показатели в этой ситуации переводятся в абстрактные числовые значения. Кривая Харрингтона делится в области от 0 до 1 на пять диапазонов и определяется функцией (безразмерной количественной переменной) с двумя участками насыщения и линейным участком. Предлагаемые соответствия между отношениями предпочтения в вербальной (лингвистической) и числовой (обобщенный показатель желательности D) системах представлены в таблице 1. «Кривая желательности» медленно изменяется в области крайних оценок («очень хорошо», «очень плохо») и быстро меняется в области средних оценок («удовлетворительно»), что типично для многих параметров безопасности, качества и надежности. В результате чего, шкала Харрингтона по существу представляет искажения экспертных оценок, вызванные их субъективным характером.

Таблица 1 – Соответствие между отношениями предпочтения в вербальной (лингвистической) и числовой системах (составлено авторами)

Лингвистическая оценка	Оценка по шкале
«Очень хорошо»	$0{,}8 < D \leq 1$
«Хорошо»	$0{,}63 < D \leq 0{,}8$
«Удовлетворительно»	$0{,}37 < D \leq 0{,}63$
«Плохо»	$0{,}20 < D \leq 0{,}37$
«Очень плохо»	$0{,}00 < D \leq 0{,}20$

Согласно ГОСТ 12.0.230.3-2016 использован пересчет конкретных показателей результативности и эффективности деятельности (ПРЭД) в абстрактные числовые значения.

Отражения зависимости оценок или показателей желательности от безразмерных показателей, в которые переводят размерные (натуральные) показатели качества передаются функцией желательности. Данная зависимость выражается следующим уравнением:

$$d = exp[-exp(-Y)], \quad (1)$$

где d – показатель желательности; Y – безразмерный показатель.

Обобщенный показатель желательности рассчитывается по формуле:

$$D = \sqrt[n]{\prod_i^n d_i}, \quad (2)$$

где d – промежуточный i-й показатель жела-

тельности.

Перевод значения размерных (натуральных) показателей x в безразмерные y при линейной зависимости между ними выполняется следующим образом:

$$y = a_0 + a_1 x, \quad (3)$$

логарифмируя дважды (1), получаем:

$$ln[ln(1/d)] = -y, \quad (4)$$

и составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_1 = -ln[-ln(d_1)]; \\ a_0 + a_1 x_2 = -ln[-ln(d_2)]. \end{cases} \quad (5)$$

Произведя совместный расчёт обоих уравнений, возможно вычислить величины коэффициентов a_0 и a_1. Уравнение линейной зависимости между исследуемым значением показателя и безразмерными значениями получаем по итогу вычислений. Полученное уравнение поможет нам определить значение y для любого показателя x, а затем по формуле (1) – «показатель желательности».

Результаты. Результатами проведенного исследования стало анкетирование 340 студентов 3-4 курса высших учебных заведений г. Белгорода и г. Москвы.

В ходе опроса было установлено, что: 51% анкетированных получали опыт совмещения трудоустройства с периодом получения образования в вузе; 94% респондентов знакомы со своими правами, обязанностями, гарантиями в области трудового права; 19% респондентов непосредственно сталкивались с происшествиями либо с несчастными случаями в период работы; 26% респондентов не имеет навыков оказания первой помощи и др.

В таблице 2 приведены итоговые результаты перевода значений размерных показателей результатов анкетирования x в безразмерные y и d.

Таблица 2 – Результаты тестирования учащихся старших курсов по различным показателям оценки ОТ с переводом их в безразмерные значения (составлено авторами)

Наименование показателя оценки ОТ	x_i	y_i	d_i
Знакомы ли Вы с основными положениями Трудового кодекса РФ в части прав, гарантий и обязанностей работника и работодателя?	94 % (0,88)	0,75	0,624
Знакомы ли Вы с основами оказания первой помощи пострадавшим при различных происшествиях?	74 % (0,48)	0,478	0,538
Как Вы считаете, необходимо ли получить опыт работы во время обучения в ВУЗе?	72 % (0,44)	0,45	0,529
Был ли проведен для Вас вводный инструктаж по охране труда при трудоустройстве?	68 % (0,36)	0,37	0,501
Был ли проведен для Вас первичный инструктаж по охране труда / стажировка на рабочем месте под руководством опытного наставника перед допуском к самостоятельной работе?	67 % (0,34)	0,35	0,494
Был ли зафиксирован факт проведения инструктажа в соответствующем журнале?	61 % (0,22)	0,224	0,450
Был ли с Вами заключен трудовой договор / либо документально оформлены трудовые отношения при трудоустройстве?	55 % (0,1)	0,1	0,405
Были ли вы обеспечены работодателем средствами индивидуальной защиты, специальной одеждой?	54 % (0,08)	0,09	0,401
Имеете ли Вы опыт трудоустройства в период обучения в ВУЗе?	51 % (0,02)	0,018	0,375
Имеете ли Вы опыт работы по специальности?	27 % (-0,46)	-0,468	0,203
Сталкивались ли Вы с какими-либо происшествиями / несчастными случаями в период работы?	19 % (-0,62)	-0,614	0,158
Происходили ли с Вами случаи травмирования на рабочих местах / при выполнении каких-либо видов работ?	17 % (-0,66)	-0,66	0,144

Обсуждение. Анализируя «кривую желательности» Харрингтона на рисунке 3, можно отметить, что наибольшее значение по кривой «у», составляет пункт о знаниях основных положений Трудового кодекса РФ в части прав, гарантий и обязанностей работника и работодателя, которое составило 0,85. Данный показатель на 0,03 единиц ниже, чем по ряду «х». По «кривой желательности» Харрингтона, данное значение составляет 0,65 единиц, что, по лингвистической оценке, ($0,63 \leq 0,65 \leq 0,8$) соответствует интервалу «Хорошо». Также данная величина является наивысшей среди остальных критериев оценки.

Второе место занимает пункт о знаниях основ оказания первой доврачебной помощи пострадавшим при различных происшествиях, который равен 0,24 единицы по кривой «у», что ниже размерных значений по показателю «х» также на 0,24. «Кривая желательности» Харрингтона стремится к более высокому значению, по сравнению с кривой «у», равному 0,45 единиц. Данный фактор действительно является очень важным, от которого на прямую зависит жизнь и здоровье людей, так что его необходимо доводить до максимально высоких значений на практике, тем более что, по лингвистической оценке, ($0,37 \leq 0,45 \leq 0,63$), данное значение соответствует интервалу «Удовлетворительно».

Следующие не менее важные показатели по проведению вводного и первичного инструктажа по охране труда при трудоустройстве занимающие промежуточные значения на «кривой жела-

тельности» Харрингтона по оси «y», составляют 0,06 и 0,03 единиц соответственно. Данные показатели на 0,3 единиц и 0,31 единицу меньше соответствующих показателей по кривой «*x*». Важно отметить, что данные значения по «кривой желательности» Харрингтона, идут на повышение и составляют 0,39 и 0,38 единиц соответственно для обоих показателей, что на 0,03 единиц и 0,04 единиц выше аналогичных значений по кривой «*x*». Данные значения, по лингвистической оценке, (0,37 ≤ 0,39 ≤ 0,63), и (0,37 ≤ 0,38 ≤ 0,63), соответствуют интервалу «Удовлетворительно».

Анализ вероятности возникновения происшествий или несчастных случаев в период работы, а также случаев травмирования на рабочих местах при выполнении каких-либо видов работ показал, что данные значения по кривой «x» составляют 19 % (-0,62 единиц) и 17 % (-0,66 единиц) соответственно. Для кривой «*y*» данные показатели слегка занижены по сравнению со значениями в ряду «*x*». Результаты по «кривой желательности» Харрингтона стремятся в сторону более высоких показателей, которые составляют 0,016 и 0,013 единиц соответственно, что безусловно имеет положительный характер. Полученные данные, по лингвистической оценке, (0,00 ≤0,016≤ 0,20) и (0,00 ≤0,013≤ 0,20), соответствуют интервалу «Очень плохо». В действительности же, невозможно добиться на практике нулевой или отрицательной статистики по травматизму или несчастным случаям на производстве.

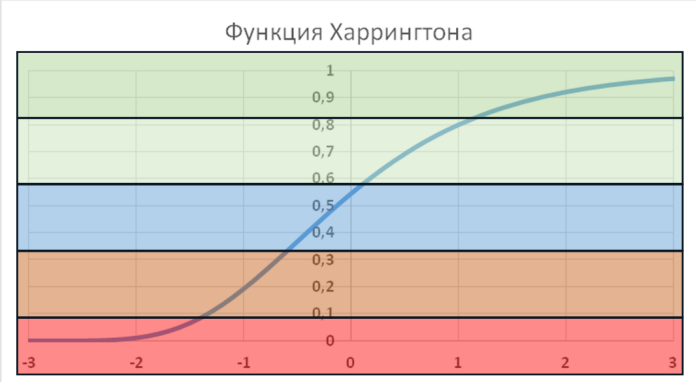


Рисунок 3 – Кривая «желательности» Харрингтона (составлено авторами)

Расчёт по обобщённому показателю желательности составил:

$$D = \sqrt[n]{\Pi_i^n d_i} = \sqrt[12]{0{,}00000531} = 0{,}365;$$

Данное значение составляет 0,37 единиц, что, по лингвистической оценке, (0,2 ≤ 0,365 ≤ 0,37), соответствует пограничному интервалу между «Плохо» и «Удовлетворительно».

Следует отметить, что прослеживается некоторая зависимость по «кривой желательности» Харрингтона в сторону снижения несчастных случаев в период работы и получения травм на рабочих местах по отношению к размерным показателям по кривой «*x*» при условии, что количество вводных и первичных инструктажей по охране труда при трудоустройстве будет расти.

Так для значений вводных и первичных инструктажей по охране труда при трудоустройстве по «кривой желательности» Харрингтона равном 0,39 и 0,38 единиц, что больше тех же значений по кривой «*x*» на 0,03 и 0,04 единиц соответственно, количество несчастных случаев в период работы и получения травм на рабочих местах снижается с 19% (-0,62 единиц) и 17% (-0,66 единиц) по кривой «*x*», до 0,016 и 0,013 единиц по «кривой желательности» Харрингтона соответственно.

Таким образом, выполненный анализ результатов исследования уровня соблюдения требований охраны труда при различных типах занятости студентов в период обучения (практики, студенческие строительные отряды, самостоятельная занятость, в т.ч. по специальности и не по специальности) показывает наличие проблемы, связанной с недостаточным учетом факторов, связанных с возрастом и компетентностью молодых работников.

Решением проблемы могут быть дополнительные формы обучения студентов требованиям трудового законодательства, правил по охране труда, дополнительное обучение по требованиям безопасности при выполнении отдельных либо же специальных видов работ, с которыми студенты могут сталкиваться при различных видах трудоустройства как во время своей образовательной деятельности, так и вне неё.

Помимо этого, требуется тщательный контроль со стороны учебных учреждений исполнения требований охраны труда в отношении несовершеннолетних студентов и, в целом, всех студентов, которые в какой-либо форме направляются для прохождения практик и на работу в строительных студенческих отрядах различной направленности (проводники РЖД, экологические отряды и т.д.).

Совместно с ректоратом БГТУ им. В.Г. Шухова разработан комплекс мероприятий по повышению качества работы со студентами в области охраны труда и проверки знаний в данной сфере, включающий в себя мероприятия по ознакомлению студентов университета с основными положениями трудового законодательства по безопасности

труда для прогнозирования и предотвращения несчастных случаев. В рамках этих мероприятий, в ВУЗе стали регулярно проводить мастер классы, на которых проводится как знакомство, так и подробное обучение студентов правилам использования средств индивидуальной защиты, разнообразные правила и стандарты исследуются в отрасли охраны труда. Также в этом своде требований находятся отдельные виды работ с высоким уровнем опасности, которые предъявляют к себе повышенного внимания, в дополнение осуществляется рассмотрение критических ситуаций на производстве, при различных видах работ с разной степенью опасности, помимо этого на рабочих местах проводятся основы оценки профессиональных рисков. В добавок к этому были разработаны учебные пособия и памятки для студентов с уклоном на охрану труда (своя программа для студентов, проходящих производственные практики, отдельно для студентов, направляемых в студенческие отряды, а также для студентов, самостоятельно устраивающихся на работу), в которых была приведена информация об их правах и обязанностях и о различных рисках на рабочих местах [23-25]. Знакомство с данными материалами проводится в рамках еженедельных кураторских часов, на которых посвящается определённое время для их подробного рассмотрения и отдельно при подготовке студентов к участию в соответствующих типах трудоустройства.

Выводы. Проведено исследование факторов с применением специальных функций, влияющих на проблему травматизма среди обучающихся ВУЗов, которые в той или иной форме участвуют в производственной деятельности предприятий (строительные и студенческие отряды, практики, самостоятельное трудоустройство). Исследование проведено методом анкетирования с последующей математической обработкой полученных результатов с использованием пересчета конкретных показателей результативности и эффективности деятельности в абстрактные числовые значения по обобщенной функции Харрингтона.

Для этого результаты анкетирования были переведены в числовую форму и выполнен расчёт показателей обобщенного значения функции желательности Харрингтона. Рассчитанное значение соответствует лингвистической оценке в пограничном интервале между «Плохо» и «Удовлетворительно». Таким образом, использование данной функции для оценки по безразмерной количественной переменной качества работы в направлении выполняемых задач со студентами по охране труда отражает присутствие недостатка уровня грамотности а также навыков применения базовых норм трудового законодательства и соответствующих требований безопасности в области охраны труда, что потенциально может стать причиной травматизма среди неопытных студентов, которые впервые попадают в незнакомую производственную обстановку полную незримых опасностей и рисков во время прохождения практик, работы в студенческих отрядах различных направлений и т.д. Этот факт подтверждается известными случаями производственного травматизма среди обучающихся ВУЗов. Необходимо учитывать всю специфику тех или иных аспектов показателей охраны труда и делать акцент на индивидуальный подход в профилактике различных происшествий для достижения наилучших результатов в перспективе. Проведенный анализ показывает, что существует некий определённый потенциал для решения данной проблемы в будущем, за счет увеличения обобщенного показателя желательности и перемещения в зону более высоких, а именно оптимальных лингвистических оценок по «кривой желательности».

Представленные результаты говорят о том, что необходимо уделять повышенное внимание вопросам обучения студентов требованиям охраны труда, ознакомлению их с основными положениями трудового законодательства, правам и обязанностям работников и работодателей в сфере труда, а также повышения культуры безопасности. В связи с тем, что подавляющая часть студентов участвует в трудовой (производственной) деятельности различных предприятий (практики, студенческие отряды, официальное и неофициальное трудоустройство, в т.ч. не по специальности) данная проблема требует дальнейшего изучения и разработки практических способов ее решения.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пузыревский Р.В., Гурский А.В., Смирнов С.Н., Арканов Ю.М., Дазмаров Н.М. Профилактика травматизма при занятии физическими упражнениями студентов высших учебных заведений // Синергия Наук. 2020. – № 52. – С. 449-454.

2. Чекшин Д.В., Фалин Н.И., Кузьминов А.Л. Исследование способов снижения травматизма в случае аварии в болидах класса «Формула студент» // Череповецкие научные чтения – 2017: Материалы Всероссийской научно-практической конференции: в 3-х частях, Череповец, 21-22 ноября 2017 года. – 2018. – С. 231-232.

3. Драговоз И.С., Елисеева Л.Н., Борисова К.Н., Жеребцова В.Д., Медведкова Ю.А. Показатели спортивного травматизма среди студентов КГМУ и меры его профилактики // Авиценна. 2019. – № 50. – С. 20-22.

4. Бекова С.К. Совмещение учебы в университете и работы: от бакалавриата до аспирантуры: информационный бюллетень. М.: НИУ ВШЭ, 2022. – 28 с.

5. Пожималин В.Н., Павлова А.Р. Способы снижения риска травматизма при занятиях спортом у студентов // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2024. – С. 516-519.

6. Евтушенко С.И., Лепихова В.А., Ляшенко Н.В., Чибинев Н.Н. Профилактика студенческого травматизма в

период обучения в вузе и работы в строительных отрядах // Строительство: наука и образование. 2021. – Т. 11. – № 4. – С. 87-101. DOI 10.22227/2305-5502.2021.4.7.

7. Филимонов В.А., Горина Л.Н. Разработка и внедрение систем менеджмента охраны здоровья и обеспечения безопасности труда и менеджмента риска в организации на основе процессного подхода // Безопасность труда в промышленности. 2019. – № 11. – С. 68-80. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-11-68-80.

8. Никулин А.Н., Должиков И.С., Климова И.В., Смирнов Ю.Г. Оценка результативности и эффективности системы управления охраной труда на горном предприятии // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 1. – С. 66-72. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-1-66-72.

9. Nikulin A., Nikulina A.Y. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company // Ecology, Environment and Conservation. – 2017. – Vol. 23. – № 1. – P. 351-355.

10. Рыжиков Е.Н., Климова Е.В., Носатова Е.А., Хлусова В.П. Совершенствование системы управления охраной труда и промышленной безопасностью с учетом анализа и прогнозирования производственного микротравматизма // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. – № 7. – С. 194-205.

11. Климова Е.В., Семейкин А.Ю., Томаровщенко О.Н. Современные тенденции повышения уровня профессиональных квалификаций в сфере безопасности труда // Содействие профессиональному становлению личности и трудоустройству молодых специалистов в современных условиях. – 2020. – С. 343-349.

12. Рыкунов Ю.Н., Тычинин Н.В. Причины травматизма студентов – нарушение правил организации и обучение студентов на занятиях физической культуры // Физическая культура, спорт и здоровье в современном обществе. Сборник научных статей Всероссийской с международным участием очно-заочной научно-практической конференции. – 2017. – С. 319-321.

13. Филёва А.В., Мартыненко А.Н. Анализ спортивного травматизма как основа совершенствования программы подготовки студентов специализации «Теория и методика хоккея» // Физическая культура и спорт в жизни студенческой молодёжи. Материалы 3-й Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 385-395.

14. Иохвидов В.В., Цыплакова М.В. Развитие координации как профилактика травматизма на занятиях по физической культуре у студентов среднего специального образования // Физическое воспитание и студенческий спорт глазами студентов. материалы IX Международной научно-практической конференции. – 2023. – С. 399-401.

15. Забненкова С.О. Профилактика травматизма у студентов в игровых видах спорта (на примере волейбола) // Разработка концепции и частных аспектов профессионально-прикладного раздела физической культуры. Материалы 77-ой Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения А.Г. Дояренко. – 2024. – С. 25-34.

16. Пуганова О.Л. Профилактика травматизма при занятиях физической культурой у студентов // Молодой исследователь: от идеи к проекту. Материалы III студенческой научно-практической конференции. Ответственный редактор Д.А. Михеева. – 2019. – С. 255-256.

17. Zisheng Lu. Analysis of China students' laboratory accidents in the past 39 years and the laboratory management reform in the future // Education for Chemical Engineers. Vol. 42. – 2023. – P. 54-60. https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.12.001.

18. Abu Hossain Muhammad Ahsan, Md. Khalid Hasan, Maruf Hasan Rumi, Taufique Ahmed, Tanjin Kabir Aunto. Students' safety culture at tertiary level academic institutes in Bangladesh: A cross-sectional study // Heliyon. Vol.10. Is. 22. – 2024. – e40155. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40155.

19. Рыбаков В.Н., Балакин Ю.П., Иванова М.М., Искуснов Я.К. Профилактика травматизма в системе физического воспитания студентов на занятиях единоборствами // Глобальный научный потенциал. – 2024. – № 5 (158). – С. 145-147.

20. Бабуров А.А., Куклицкий А.В Профилактика травматизма в процессе физического воспитания студентов // Студенческая наука: современные реалии. Сборник материалов IV Международной студенческой научно-практической конференции. – 2018. – С. 31-34.

21. Хатмуллина Г.Р., Вадулина Н.В., Ямалетдинова К.Ш., Бакиров Р.Х. Проблемы расследования несчастных случаев с обучающимися в образовательных учреждениях // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2024. – № 1(25). – С. 151-158.

22. Минько В.М., Басараб А. О проблеме учета несчастных случаев и о снижении травмоопасности в строительстве // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 5. – С. 43-47.

23. Климова Е.В., Семейкин А.Ю., Едаменко А.С., Томаровщенко О.Н. Практическое руководство по охране труда для студентов на период прохождения практики. Белгород, 2021. 72 с.

24. Климова Е.В., Семейкин А.Ю., Едаменко А.С., Томаровщенко О.Н. Практическое руководство по охране труда для студентов осуществляющих, трудовую деятельность. Белгород, 2021. – 68 с.

25. Климова Е.В., Семейкин А.Ю., Едаменко А.С., Томаровщенко О.Н. Практическое руководство по охране труда для бойцов студенческих строительных отрядов. Белгород, 2021. – 226 с.

Статья поступила в редакцию 14.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.45:004
EDN: WWRHZJ

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 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 виртуальную 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 – № 3(71). – С. 153-157. – EDN: WWRHZJ.*

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 надежности технических систем. Значительное количество работ посвящено исследованию человеческого фактора и его влияния на безопасность в таких сферах человеческой деятельности как авиация и судовождение. 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 признанием 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 компонентов, 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 $P_{прог}$:

– $0,7< P_{прог} <1$ компонент ЧФ может быть отнесен к управляемым:

– $0,1 < P_{прог} < 0,7$ компонент ЧФ может быть отнесен к слабоуправляемым;

– $0,1 > P_{прог}$ компонент ЧФ может быть отнесен к не управляемым.

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:

$$HF = HF_c + HF_{ис} \quad (1)$$

где *HF* (*Human Factor*) – Человеческий фактор (ЧФ);

HF_c – *Human Factor Controllable* – управляемые компоненты ЧФ фактора, входящие в группу 1;

$HF_{ис}$ – *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 пред-

положить 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 формализация 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 воздействия. В частности, признание тождества между управляе-

мыми 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 вырабатывать 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 СО Макарова. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 180-190.

3. Saghafian 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 судовождении // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала СО 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: AGIKBU.

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., Герегей 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 21.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.451, 331.452, 331.453
EDN: VSJMQB

ПРИЕМЫ КОНЦЕПЦИИ «БЕЗОПАСНОСТЬ-II» КАК СПОСОБ ПРОФИЛАКТИКИ СТРЕССА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8546-0100
AuthorID: 838615
ORCID: 0000-0001-8434-7519

ЗУБКОВА Аделина Дамировна, кандидат химических наук,
доцент кафедры «Промышленная безопасность»
Казанский национальный исследовательский технологический университет
(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: ZubkovaAD@corp.knrtu.ru)

SPIN: 9461-3222
AuthorID: 765369
ORCID: 0000-0002-0400-0986

ХАЙРУЛЛИНА Ляйсан Исмагиловна, кандидат социологических наук, доцент,
доцент кафедры «Промышленная безопасность»
Казанский национальный исследовательский технологический университет
(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: lhda79@mail.ru)

Аннотация. Рассматриваются причины и последствия стресса на рабочем месте, испытываемого сотрудниками предприятий. Авторы подчеркивают, что оцениваемые параметры, указанные в нормативных документах, и применяемые методы оценки напряженности трудового процесса не отражают состояние сотрудника, испытывающего стресс на рабочем месте. Поэтому вопрос оценки напряженности труда, которая вызвана или усугублена стрессом работника, испытываемым им вследствие повсеместной цифровой интеграции, необходимостью регулярной отчетности, дефектами управления организацией, обесцениванием усилий сотрудников, особенностями взаимоотношений между коллегами и другими факторами, безусловно, актуален. Показано, что методы оценки уровня стресса на рабочем месте на сегодняшний день отражены в ГОСТ Р 55914-2013 «Менеджмент риска. Руководство по менеджменту психосоциального риска на рабочем месте» и связаны с оценкой психосоциального риска на рабочем месте. Авторами отмечается тот факт, что для профилактики стрессовых состояний у работника, может быть разработана долгосрочная стратегия, являющаяся частью управления психосоциальными рисками организации. Однако, положения данного документа носят рекомендательный характер и не являются обязательными. С целью снижения уровня стресса на рабочем месте, авторы предлагают применять приемы концепции «Безопасность-II», основанной на анализе результатов рутинных рабочих операций, завершившихся благополучно, то есть без сбоев и ошибок. К данным приемам относятся ежедневные обходы участков производственных помещений или рабочих мест, прием «День из жизни», команды обучения, тренажерное имитационное обучение без «правильных ответов», обучающие оценочные мероприятия.

Ключевые слова: концепция «Безопасность-II», Safety Differently, стресс на работе, эмоциональное состояние, психосоциальные риски, напряженность труда, безопасность труда, снижение травматизма, обеспечение безопасности, корпоративная стратегия.

TECHNIQUES OF THE "SAFETY-II" CONCEPT AS A WAY TO PREVENT STRESS IN THE WORKPLACE

© The Author(s) 2025

ZUBKOVA Adelina Damirovna, candidate of chemical sciences,
associate professor of the Department of Industrial Safety
Kazan National Research Technological University
(420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 68, e-mail: ZubkovaAD@corp.knrtu.ru)

KHAIRULLINA Liaisan Ismagilovna, candidate of sociological sciences, associate professor,
associate professor of the department of «Industrial Safety»
Kazan National Research Technological University
(420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 68, e-mail: lhda79@mail.ru)

Abstract. The causes and consequences of workplace stress experienced by employees of enterprises are considered. The authors emphasize that the estimated parameters specified in the regulatory documents and the methods used to assess the intensity of the labor process do not reflect the state of an employee experiencing stress in the workplace. Therefore, the issue of assessing work intensity, which is caused or aggravated by the stress an employee experiences as a result of widespread digital integration, the need for regular reporting, defects in organizational management, devaluation of employee efforts, peculiarities of relationships between colleagues and other factors, is certainly relevant. It is shown that methods for assessing the level of stress in the workplace today are reflected in GOST R 55914-2013 "Risk management. Guidelines for the management of psychosocial risk in the workplace" and are related to the assessment of

psychosocial risk in the workplace. The authors note the fact that in order to prevent stressful conditions in an employee, a long-term strategy can be developed, which is part of the organization's psychosocial risk management. However, the provisions of this document are advisory in nature and are not mandatory. In order to reduce stress in the workplace, the authors propose to apply the techniques of the "Safety-II" concept, based on the analysis of the results of routine work operations that ended successfully, that is, without failures and errors. These techniques include daily rounds of industrial premises or workplaces, a "Day in a lifetime" reception, training teams, simulator simulation training without "correct answers", and training assessment events.

Keywords: the concept of "Safety-II", Safety Differently, stress at work, emotional state, psychosocial risks, work intensity, occupational safety, injury reduction, safety, corporate strategy.

Для цитирования: *Зубкова А.Д. Приемы концепции «Безопасность-II» как способ профилактики стресса на рабочем месте / А.Д. Зубкова, Л.И. Хайруллина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 158-166. – EDN: VSJMQB.*

Введение. В последние годы глобализация и цифровая трансформация многих сфер деятельности человека предоставила новые перспективы для экономического роста, но также увеличила вероятность возникновения «усталости» работника от «цифрового шума», многозадачности, ускорения и увеличения потока информации. Все эти изменения непосредственным образом влияют на условия труда работников, их права, организацию труда, что влечет за собой трансформацию трудовых отношений и возникновение различных моделей занятости.

Неблагоприятное сочетание условий труда и эмоционального состояния работника могут вызвать у него эмоциональные расстройства, увеличить риск развития психосоматических проблем, привести к производственным ошибкам и изменениям в показателях самочувствия.

При этом необходимо отметить, что проявление стресса связано с индивидуальной реакцией работника. Высокий уровень стресса может способствовать развитию нарушений здоровья психического и поведенческого характера, а также провоцировать так называемое профессиональное выгорание. Впоследствии названные расстройства могут привести к развитию депрессии, эмоционально-нервному истощению, нарушению работы сердечно-сосудистой системы [1]. В то же время стресс на работе увеличивает вероятность травм среди сотрудников. Существует несколько факторов, способствующих увеличению числа несчастных случаев и травм на рабочем месте. К ним относятся высокая рабочая нагрузка, строгие требования к качеству и содержанию выполняемой работы, недостаточная поддержка со стороны руководства, конфликты с коллегами, а также чрезмерная монотонность труда. Эти обстоятельства могут негативно сказываться на психоэмоциональном состоянии сотрудников и увеличивать риск возникновения опасных ситуаций.

Много исследований посвящено оценке влияния эмоционального состояния работника на его профессиональную деятельность и продуктивность. Выявлены профессиональные группы, специалисты которых имеют повышенный уровень стресса в процессе трудовой деятельности. К ним отнесены медицинские сестры [2], врачи различных специализаций [3-6], учителя [7], психологи [8], журналисты [9], спортсмены [10], работники полиции и службы исполнения наказаний [11, 12], сотрудники экстренных служб [13].

Стрессом чаще всего называют реакцию, которая появляется, когда наблюдается несоответствие между доступными ресурсами и предъявляемыми требованиями. Такая реакция организма может быть как физической, так и эмоциональной. Стресс не называют заболеванием, однако он является сигналом негативного воздействия на организм человека. По своей сути, стресс – это реакция на различные психосоциальные риски, которая изначально влияет на физическое и психическое здоровье человека, а впоследствии и на его благополучие в целом.

Существует также понятие «профессионального стресса», который возникает при осуществлении работником своей трудовой деятельности, а также при планировании различных рабочих задач. Чаще всего такая реакция вызвана противоречиями между предъявляемыми работодателем требованиями и имеющимися у работников квалификацией, потребностями, мотивацией и ресурсами.

Согласно анализу литературы, проведенному авторами, известны результаты исследования стресса на рабочем месте для групп профессий, связанных с межличностными коммуникациями или с повышенным риском для жизни. Однако отсутствуют исследования данного явления для специалистов производственного сектора.

Методология. В настоящее время уровень стресса работника на рабочем месте определяется посредством оценки психосоциального риска на рабочем месте и регламентируется ГОСТ Р 55914-2013 «Менеджмент риска. Руководство по менеджменту психосоциального риска на рабочем месте» [14].

Согласно определению данного документа, стресс на работе – это комбинация эмоциональных, когнитивных, поведенческих и психологических реакций на неблагоприятные и вредные аспекты должностных обязанностей, организации и условий работы. В свою очередь под психосоциальным риском понимается вероятность того, что взаимодействие между содержанием работы, ее организацией и управлением, другими внешними и ор-

ганизационными условиями, компетенциями и потребностями работников, окажут опасное воздействие на их здоровье через субъективное восприятие и опыт.

ГОСТ Р 55914-2013 определяет основные принципы управления психосоциальными рисками, основываясь на концепции контрольного цикла. Этот процесс включает в себя несколько этапов (рис. 1).

В стандарте акцентируется внимание на том, что оценка рисков является ключевым элементом управления. Для практической оценки психосоциальных рисков руководство рекомендует использовать зарубежные методики, разработанные учеными из Великобритании, Испании и некоторых скандинавских стран. Данные методики основываются на анкетировании, но также допускается использование других качественных методов и метода наблюдений [15]. Указанный документ носит рекомендательный характер и может применяться по усмотрению руководителя организации.

Отметим также ФЗ № 426 «О специальной оценке условий труда» [16], где применительно к стрессу на рабочем месте исследованию и измерению подлежит только напряженность трудового процесса работников, трудовая функция которых связана с:

а) диспетчеризацией производственных процессов, управлением транспортными средствами (длительность сосредоточенного наблюдения, плотность сигналов (световых, звуковых) и сообщений в единицу времени, число производственных объектов одновременного наблюдения, нагрузка на слуховой анализатор, время активного наблюдения за ходом производственного процесса);

б) обслуживанием производственных процессов конвейерного типа (продолжительность выполнения единичной операции, число элементов (приемов), необходимых для реализации единичной операции);

в) длительной работой с оптическими приборами;

г) постоянной нагрузкой на голосовой аппарат.

Как видно из представленного перечня, в нем не учтены такие факторы трудового процесса, как режим работы, эмоциональные и интеллектуальные нагрузки [17].

Оценка напряженности трудового процесса проводится согласно Руководству по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса Р 2.2.2006-05 [18].

Согласно определению, приведенному в данном документе, «напряженность – характеристика трудового процесса, отражающая нагрузку преимущественно на центральную нервную систему, органы чувств, эмоциональную сферу работника». Факторы, влияющие на напряженность труда, включают интеллектуальные, сенсорные и эмоциональные нагрузки, а также уровень монотонности работы и режим труда. В контексте эмоциональных нагрузок руководство выделяет несколько ключевых показателей напряженности трудового процесса (табл. 1).

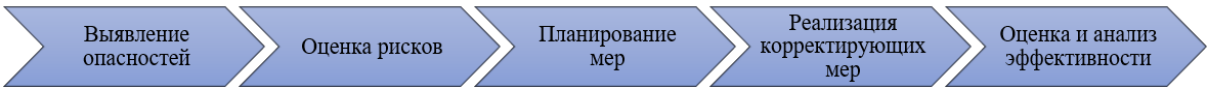


Рисунок 1 – Концепция контрольного цикла

Таблица 1 – Показатели напряженности трудового процесса по эмоциональным нагрузкам по Р 2.2.2006-05

Показатель напряженности трудового процесса по эмоциональным нагрузкам	Характеристика показателя
Степень ответственности за результат собственной деятельности. Значимость ошибки	Степень влияния работника на результаты собственного труда при различных уровнях сложности осуществляемой деятельности. С возрастанием сложности повышается степень ответственности, поскольку ошибочные действия приводят к дополнительным усилиям со стороны работника или целого коллектива, что соответственно приводит к увеличению эмоционального напряжения
Степень риска для собственной жизни	Характеризует те рабочие места, где существует прямая опасность
Степень ответственности за безопасность других лиц	Учитывается прямая ответственность за правильную организацию работы в потенциально опасных условиях, выполнение инструкций по охране труда и технике безопасности
Количество конфликтных ситуаций, обусловленных профессиональной деятельностью, за смену	Наличие конфликтных ситуаций в производственной деятельности увеличивает эмоциональную нагрузку, подлежат количественной оценке путем подсчета указанных ситуаций за период наблюдения

Анализ нормативной правовой документации, проведенный авторами, выявил несоответствия в параметрах, методах выявления и учета эмоционального состояния работников. ФЗ № 426 «О специальной оценке условий труда» вообще не рассматривает эмоциональные нагрузки, приводящие к стрессу на рабочем месте, а Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса Р 2.2.2006-05 не учитывает стрессовые ситуации, причины их возникновения, а также степень их влияния на работника. Также показатель «напряженность труда», указанный в рассмотренных документах, не учитывает специфику производства, не обладает достаточной точностью и сложен для интерпретации [19].

В настоящее время остается не ясным как оценить напряженность трудового процесса, связанную со стрессом на рабочем месте, испытываемым

сотрудниками вследствие повсеместной цифровой интеграции, необходимостью регулярной отчетности, дефектами управления организацией, обесцениванием усилий сотрудников, низкой оплаты труда, особенностями взаимоотношений между коллегами, недостаточным уровнем материальной базы предприятий [20].

Сейчас стало очевидным, что организация и методы управления предприятием обуславливают эмоциональное состояние работников. В связи с возрастающими потоками информации, повсеместным применением цифровых технологий, забота об эмоциональном благополучии сотрудников становится важным приоритетом для работодателей наряду с повышением производительности, что ведет к изменениям в подходах управлению безопасностью труда.

Для того, чтобы минимизировать влияние стресса и способствовать его профилактике ГОСТ Р 55914-2013 рекомендует принять организациям долгосрочную стратегию управления психосоциальными рисками [14]. При ее формировании необходимо учитывать структуру организации, имеющиеся у нее ресурсы, осуществляемые ею операции и другие факторы. В данном документе перечислены различные подходы к управлению профессиональным стрессом, которые необходимо разрабатывать в сотрудничестве с работниками и/или их представителями. Эти подходы могут быть реализованы путем создания плана мероприятий, направленных на снижение рисков. При этом корректирующие действия в рамках управления психосоциальными рисками делятся на три уровня (рис. 2).

Стратегия организации по управлению психосоциальными рисками и профилактикой стресса на рабочем месте разрабатывается по усмотрению самого предприятия и может быть вариативной.

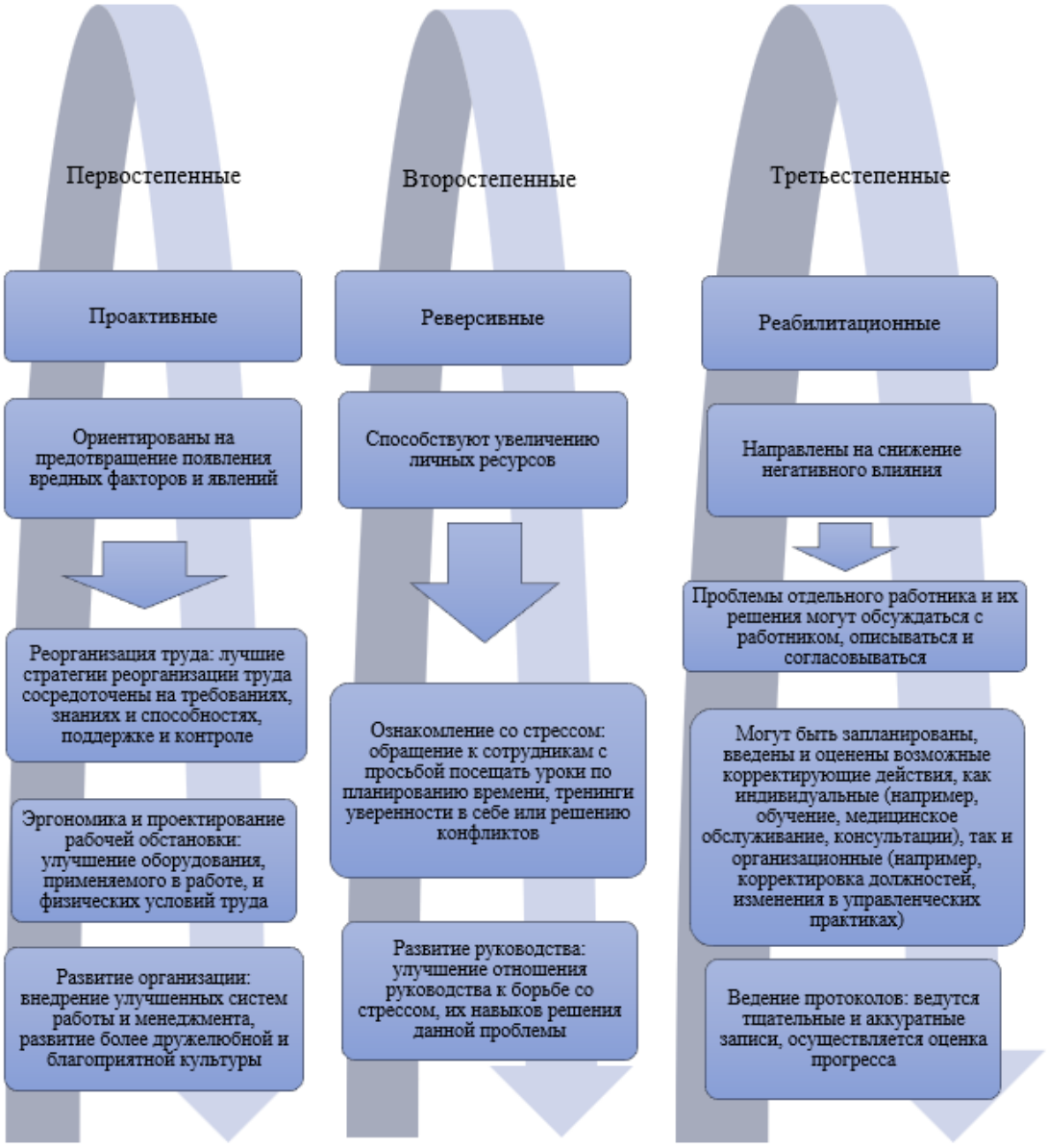


Рисунок 2 – Корректирующие действия в рамках управления психосоциальными рисками

В качестве возможного варианта такой стратегии авторы данной статьи предлагают применить подход в рамках концепции «Безопасность-II» или Safety Differently.

Результаты. Концепция «Безопасность-II» была предложена Эриком Холлнагелем в 2000-х годах. Окончательно ее положения сформулированы к 2013 году и отражены в работах Холлнагеля, Уирза, Брейтуэйта и Деккера, в которых она была названа концепцией Safety-II или Safety Differently [21-26].

В традиционном подходе «Безопасность-I» исследуются причины негативного события, но они происходят не часто, а текущие рабочие процессы чаще всего протекают без серьезных последствий. Концентрация на причинах отрицательных событий исключает из анализа информацию об успешно выполненных операциях рабочего процесса. Концепция «Безопасность-I» рассматривает в качестве источника ошибок на производстве человека, тем самым транслируя идею его замены автоматическими системами, роботами и т.д. или максимально регламентирует его действия, а, следовательно, ограничивает адаптационные возможности работника. В обычных условиях этот подход может быть действенным, однако в ситуациях, когда возникают непредвиденные обстоятельства, он возлагает всю ответственность за происходящее и итоговый результат на работника, не предоставляя ему при этом необходимых ресурсов для успешного разрешения возникшей проблемы [27].

В подходе «Безопасность-II» анализируются рабочие операции, реализованные без сбоев, ошибок и завершившиеся благополучно. Рассмотрение таких исходов дает больший объем информации, поскольку они происходят чаще, что позволяет предотвратить негативные события в будущем. В рамках данной концепции человек понимается как ключевой элемент производственного процесса, который принимает решения, в том числе, отсутствующие в разработанных алгоритмах, проявляя определенную вариабельность. Гибкость человеческого разума является как источником ошибок, так и основой творческого подхода, позволяющего находить оптимальные решения в нестандартных ситуациях. Эта способность помогает людям выявлять и исправлять как собственные, так и чужие ошибки. Благодаря этому рабочие процессы завершаются успешно, поскольку именно человек принимает обдуманные решения в условиях неопределенности [27].

В основе концепции «Безопасность-II» лежит 4 принципа, представленные на рисунке 3.

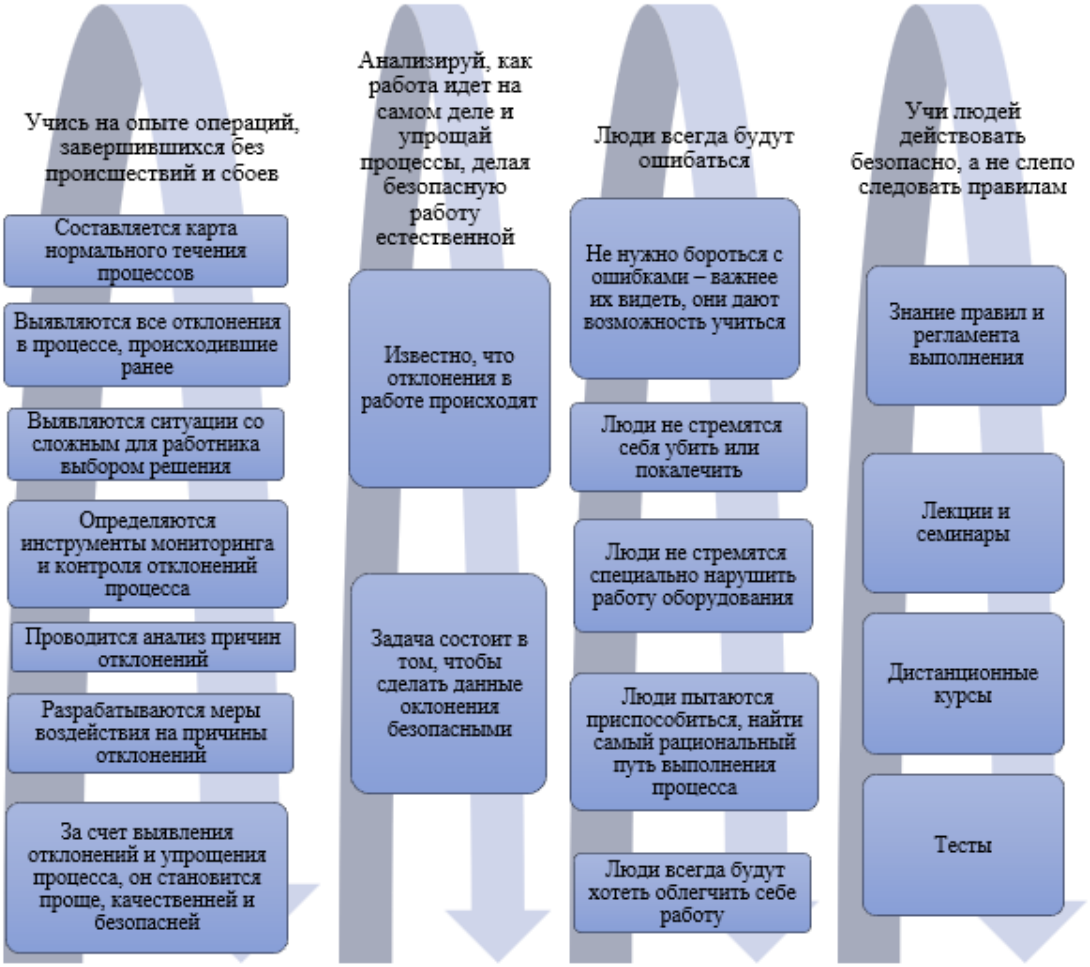


Рисунок 3 – Принципы концепции «Безопасность-II»

Концепция «Безопасность-II» фокусируется не только на предотвращении ошибок, но и на укреплении способности системы (организации) и работников адаптироваться к неожиданным ситуациям, сохраняя устойчивость. В контексте управления стрессом работников это означает смещение акцента с «борьбы со стрессом» на развитие гибкости, ресурсов и навыков, которые помогают сотрудникам справляться с нагрузками и восстанавливаться.

В рамках исследования процессов управления стрессом был проведен анализ того, как сотрудники могут успешно справиться с нагрузками, вызывающими у них стресс. Обобщение некоторых практик концепции «Безопасность-II» и возможные приемы их реализации отражены в таблице 2.

Таблица 2 – Ключевые практики концепции «Безопасность-II» и варианты практической реализации

Название практики	Суть	Приемы
Анализ успешных операций, обучение на основе удачного опыта	Изучение ситуаций и действий работников, эффективно справившихся со стрессом в сложных условиях (нештатных ситуациях), анализ успешных практик сотрудников	– Интервью, беседы с сотрудниками; – сбор данных; – анализ успешных кейсов; – тренинги с участием опытных сотрудников.
Развитие адаптивности	Обучение сотрудников навыкам резильентности (гибкости): управлению эмоциями, гибкому мышлению, восстановлению после нагрузок, способность адаптироваться к изменяющимся условиям в экстренных ситуациях. Проведение игровых сессий в которых команды моделируют стрессовые сценарии (дедлайны, конфликты) и ищут адаптивные решения	– Моделирование сложных ситуаций; – стресс тесты; – инструменты для самостоятельного принятия решений; – методология управления проектами Agile (эджайл); – тренинги по практикам mindfulness (Майндфулнес), тайм-менеджменту или когнитивно-поведенческим техникам для снижения тревожности; – комнаты релаксации; – аудиомедитации.
Укрепление социальной поддержки	Создание среды, где сотрудники могут открыто обсуждать стрессовые ситуации и получать помощь, поощрение сотрудников за обмен опытом борьбы со стрессом	– Анонимные отчеты; – регулярные обсуждения; – внедрение программы «buddy-менторства»; – программы поощрения; – наставничество.
Гибкость рабочих процессов	Разрешение сотрудникам адаптировать график, задачи или условия работы под свои потребности; внедрение правил, ограничивающих внеурочные сообщения и стимулирующих отдых; физическая и цифровая детоксикация	– Гибкий график; – возможность удалённой работы; – микро-паузы для восстановления; – отклонение от стандартных протоколов (динамические чек-листы, алгоритмы принятия решений в условиях неопределенности).
Проактивный мониторинг	Регулярный сбор информации о психологическом состоянии сотрудников (например, через анонимные опросы), быстрое реагирование на проблему	– Анализ уровня стресса по данным о рабочей нагрузке; – открытое обсуждение стресса для уменьшения страха осуждения; – *IoT* устройства (интернет вещей); – системы предиктивной аналитики; – инновационные лаборатории; – сервисы психологической поддержки.

Люди на всех уровнях организации создают безопасность посредством практики. Помимо вышеназванных практических приемов, в зарубежной литературе выделяют также следующие подходы. Авторы [22] полагают, что, когда ситуация развивается благополучно в сложных обстоятельствах, это происходит из-за адаптивной способности людей – их способности распознавать, усваивать и адаптироваться к изменениям и сбоям. Это называется устойчивостью – способностью приспосабливаться к изменениям и нарушениям без катастрофических неудач. Устойчивость заключается не в уменьшении негативных моментов (инцидентов, ошибок, нарушений). Она заключается в выявлении и последующем усилении позитивных возможностей людей и организаций, которые позволяют им эффективно и безопасно адаптироваться к изменившимся условиям [22].

Вместо анализа причин несчастных случаев необходимо изучать успешно выполненные операции, внедрять процессы, которые позволяют организации больше узнавать о них. Это может быть реализовано через ежедневные обходы участков производственных помещений или рабочих мест [23].

Более ресурсоемкие подходы к пониманию и анализу успешной работы могут заключаться в применении приема «День из жизни». При реализации данного приема менеджеры или специалисты по безопасности проводят рабочие

смены вместе с работниками [24]. Это позволяет менеджерам более детально изучить приемы и навыки, используемые работником. Кроме того, коммуникация между работниками и менеджерами формируется посредством обмена опытом, что повышает доверие к организации [24].

Команды обучения [28] – еще один инструмент для анализа рутинных рабочих процессов. Его можно назвать методом наставничества. В рамках этого подхода опытные сотрудники делятся своими знаниями и навыками с новичками, что способствует более глубокому пониманию задач и процессов. Вовлечение специалистов с большим опытом позволяет вновь принятым работникам не только освоить конкретные операции, но и выявить потенциальные области для улучшения деятельности. Такой подход создает атмосферу сотрудничества и вовлеченности, где молодые работники или вновь принятые сотрудники могут активно участвовать в обсуждении возможных изменений. Это не только повышает мотивацию сотрудников, но и способствует более эффективному внедрению улучшений, так как они уже чувствуют свою причастность к процессу. В результате команда становится более сплоченной, а рабочие процессы – более оптимизированными [28].

Используя названные приемы, возможно получить большой объем информации о ежедневных рутинных производственных процессах, которую рекомендуется использовать для обучения и адаптации поведения сотрудников на рабочих местах [25]. Кроме того, можно выявить уязвимые места и слабые стороны сотрудников с целью их дальнейшей коррекции [26].

Гибкости и принятию решений работников можно обучать на тренажерах различного вида и типа. Это могут быть тренажеры с использованием цифровых технологий, имитации реального оборудования и площадок, а также другие варианты. Суть применения данного метода заключается в том, что воспроизведение рабочей обстановки сотрудника и различных ситуаций в этой обстановке должны способствовать развитию у работника навыка принятия нестандартных решений. Такие тренажеры не призваны автоматизировать рабочие процессы. Наоборот, их функция в том, чтобы создавать нестандартные ситуации для поиска работником оптимального выхода в сложных или неоднозначных условиях. Концепция «Безопасность-II» предполагает в рамках такого обучения углубленное усвоение принципов безопасного поведения работниками. При этом необходимо отметить, что в случае принятия обучаемыми работниками неверных решений, им предлагается вариант обсуждения и анализа ситуации с рассмотрением альтернативных вариантов событий, а не готовое решение, как в классическом варианте обучения. Так уже обучают пилотов, диспетчеров, машинистов поездов и специалистов других профессий. И такой опыт необходимо тиражировать [27]. Однако не все ситуации можно «порепетировать» на тренажере. Для многих отраслей и профессий их применение трудно реализуемо в ресурсном и методическом отношении. В этом случае возможно применение различных оценочных мероприятий. Цель любых оценочных мероприятий в рамках концепции «Безопасность-II» научить работников не только распознавать опасности и риски своего рабочего места, но и принимать решения в нестандартных ситуациях, с учетом тех условий безопасности, в которых они находятся. Обучаемый может столкнуться с описанием сложной ситуации, где следовать привычным нормам бывает сложно. Чтобы избежать стресса в реальных условиях или для его профилактики, работник имеет возможность предложить свои действия или ответить на ипсативные вопросы. Эти вопросы предлагают несколько вариантов действий, которые необходимо оценить с точки зрения безопасности, разделив их на две категории: те, что повышают безопасность, и те, что ее снижают.

Обсуждение. В последнее время все больше компаний внедряют различные формы психологической поддержки сотрудников.

По мнению авторов, используемые предприятиями инструменты реализуют практики концепции «Безопасность-II», однако сами предприятия об этом не заявляют.

В таблице 3 отражены варианты практической реализации приемов концепции «Безопасность-II» на российских предприятиях и заявленные результаты их применения.

Таким образом, применяя вышеназванные приемы и инструменты, основанные на концепции «Безопасность-II», можно получить большой объем информации о трудовых операциях, выявить соответствующие закономерности, обучить приемам и привить навыки безопасного выполнения работ, снизить уровень тревоги, поддержать высокий уровня работоспособности и стрессоустойчивости работников, что, в свою очередь, будет способствовать снижению уровня стресса на рабочем месте, а также уменьшит психосоциальные риски, способствуя профилактике стрессовых ситуаций.

Как правило, специалисты, курирующие на предприятиях вопросы безопасности, в ВУЗах обучаются по направлениям 20.03.01 и 20.04.01 «техносферная безопасность». Авторы предлагают ввести в преподаваемые им дисциплины, обучение описанным приемам, реализующим принципы концепции «Безопасность-II». Это позволит данным специалистам применять принципиально иной подход в своей будущей профессиональной деятельности, заключающийся в применении гибких, адаптивных правил, проактивном реагировании в управлении безопасностью. Соответствующие компетенции дадут им возможность стать более конкурентоспособными на рынке труда.

Таблица 3 – Варианты практической реализации концепции «Безопасность-II» и результаты их применения

Название компании	Применяемая практика концепции «Безопасность-II»	Инструменты реализации	Результат применения
ПАО «КамАЗ» [29, 30]	Анализ успешных операций, обучение на основе удачного опыта	– Каскадное обучение сотрудников; – Использование уникальных методик обучения рабочих групп проектов и эталонных участков; – Обучение вновь принимаемых работников; – PSK – производственная система ПАО «КамАЗ»	Обучение персонала технологиям бережливого производства, возможности справляться с внезапными поломками оборудования, сохраняя производственный процесс. Фокус на профилактике, а не на устранении стресса
	Развитие адаптивности	Комнаты психологической разгрузки	Улучшение условий труда и отдыха работников, восстановление эмоционального равновесия, снижение физических симптомов стресса
ПАО Сбербанк [31]	Анализ успешных операций, обучение на основе удачного опыта	– Тренинги для менеджеров; – мастер-классы по успешному разрешению конфликтов с клиентами в условиях стресса	Фокусировка не на разборе ошибок, а на примере оптимальных решений для повышения клиентоориентированности, личной эффективности
	Развитие адаптивности	Курсы по обучению выработки персональных стратегий профилактики стресса	Улучшение качества жизни сотрудников, развитие устойчивости к проблемам в профессиональной и личной сфере
ОАО «РЖД» [32]	Развитие адаптивности	– Психологические тренинги сотрудников по навыкам саморегуляции и управления реакциями на стрессовое событие после железнодорожных происшествий; – аппаратно-программные комплексы биологической обратной связи; – комната психологической разгрузки	Снижение уровня тревоги, поддержание высокого уровня работоспособности и стрессоустойчивости работников, что позволяет сохранить трудоспособный коллектив в любых условиях
Госкорпорация «Росатом» [33]	Укрепление социальной поддержки	Отраслевая коммуникационная платформа Atom Space с широким функциональным комплексом, включающим мессенджер, возможность голосовых вызовов, стриминг, «личный кабинет» с добавлением необходимых сервисов	Улучшение и расширение возможностей коммуникаций внутри компании, трансформация платформы в мобильное рабочее место
ПАО «Газпром» [34, 35]	Гибкость рабочих процессов	«Технический предел» - управленческий алгоритм непрерывного повышения эффективности производства	Повышение безопасности работ, сокращение сроков бурения, повышение культуры производства, снижение непроизводительного времени работы
АК «АЛРОСА», ОАО «Уралкалий», ПАО «НЛМК», ПАО «ГМК «Норникель» [36]	Проактивный мониторинг	Система «ЮМС Диагностический шлюз», программно-аппаратный комплекс «ЭСМО»	Диагностика состояния сотрудников во время рабочей смены, признаков профессиональных заболеваний
ПАО «ВымпелКом» [37]	Проактивный мониторинг	Программа благополучия сотрудников BeeWINNER, включающая марафоны для поддержки психологического здоровья сотрудников, лекции, прямые линии с психологом	Предотвращение выгорания, умение работать со стрессом и его последствиями

Выводы. Концепция «Безопасность-II» предоставляет альтернативу многим традиционным подходам к безопасности, поскольку стремится не только минимизировать негативные моменты производственного процесса, но и расширить позитивные. Концепция «Безопасность-II» в управлении стрессом – это не «волшебная таблетка», а системный подход, требующий вовлечения руководства, пересмотра корпоративной культуры и инвестиций в развитие сотрудников. Акцент смещается с анализа причин ошибок на анализ правильных действий работника. При этом данный поход рассматривает людей как решение, которое позволяет избежать сбоя, а не как проблему, которую нужно контролировать. Предприятие фокусируется на том, чтобы позволить работникам успешно выполнять рабочие задачи, что в свою очередь позволит им чувствовать себя более уверенными и спокойными, а, следовательно, испытывать меньше стресса. Применение различных мер и инструментов, рассмотренных авторами в рамках концепции «Безопасность-II», являются подтверждением данного утверждения, так как помогают создать более безопасную и поддерживающую рабочую среду, снизить уровень тревоги работников, поддержать высокий уровень работоспособности и стрессоустойчивости работников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Новикова А.В., Широков В.А., Егорова А.М. Напряженность труда как фактор риска развития синдрома эмоционального выгорания и тревожно-депрессивных расстройств в различных профессиональных группах (обзор литературы). Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2022;(10):67-74. https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-10-67-74.

2. Hall VP, White KM, Morrison J. The influence of leadership style and nurse empowerment on burnout. Nurs Clin North Am. 2022;57(1):131-141. https://doi.org/10.1016/j.cnur.2021.11.009.

3. High-level burnout in physicians and nurses working in adult ICUs: a systematic review and meta-analysis / L. Papazian, S. Hraiech, A. Loundou [et al.] // Intensive Care Medicine. – 2023. – Vol. 49, No. 4. – P. 387-400. – DOI 10.1007/s00134-023-07025-8.

4. Agarwal SD, Pabo E, Rozenblum R, Sherritt KM. Professional dissonance and burnout in primary care: A qualitative study. JAMA Intern Med. 2020;180(3):395- 401. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2019.6326.

5. Maslach C, Leiter MP. Understanding the burnout experience: Recent research and its implications for psychiatry. World Psychiatry. 2016;15(2):103-111. https://doi.org/10.1002/wps.20311.

6. Leung J, Rioseco P, Munro P. Stress, satisfaction and burnout amongst Australian and New Zealand radiation oncologists. J Med Imaging Radiat Oncol. 2015;59(1):115-124. https://doi.org/10.1111/1754-9485.12217.

7. Pedditzi ML, Nonnis M, Nicotra EF. Teacher satisfaction in relationships with students and parents and burnout. Front Psychol. 2021;12:703130. https://doi.org/10.3389/ fpsyg.2021.703130.

8. Simpson S, Simionato G, Smout M, et al. Burnout amongst clinical and counselling psychologist: The role of early maladaptive schemas and coping modes as vulnerability factors. Clin Psychol Psychother. 2019;26(1):35-46. https://doi.org/10.1002/cpp.2328.

9. Gascón S, Fueyo-Díaz R, Borao L, et al. Value conflict, lack of rewards, and sense of community as psychosocial risk factors of burnout in communication professionals (press, radio, and television). Int J Environ Res Public Health. 2021;18(2):365. https://doi.org/10.3390/ijerph18020365.

10. Groenewal PH, Putrino D, Norman MR. Burnout and motivation in sport. Psychiatr Clin North Am. 2021;44(3):359-372. https://doi.org/10.1016/j.psc.2021.04.008.

11. Testoni I, Nencioni I, Ronconi L, Alemanno F, Zamperini A. Burnout, reasons for living and dehumanisation among Italian penitentiary police officers. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(9):3117. https://doi.org/10.3390/ijerph17093117.

12. Jin X, Sun IY, Jiang S, Wang Y, Wen S. The impact of job characteristics on burnout among Chinese correctional workers. Int J Offender Ther Comp Criminol. 2018;62(2):551-570. https://doi.org/10.1177/0306624X16648419.

13. Carleton RN, Afifi TO, Taillieu T, et al. Anxiety-related psychopathology and chronic pain comorbidity among public safety personnel. J Anxiety Disord. 2018; 55:48-55. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2018.03.006.

14. ГОСТ Р 55914-2013 Менеджмент риска. Руководство по менеджменту психосоциального риска на рабочем месте: дата введения 01.12.2014. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 42 с.

15. Любимкина, Т.А. Проблемы оценки и управления психосоциальными рисками: российский и зарубежный опыт / Т.А. Любимкина, С.В. Иванова // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – Т. 6, № 2(22). – С. 168-179. – DOI 10.21285/2500-1582-2021-2-168-179. – EDN QPDHRS.

16. Федеральный закон №426-ФЗ от 28 декабря 2013 г. «О специальной оценке условий труда» // Официальный портал правовой информации pravo.gov.ru. – 2013.

17. Юшкова О.И. Бухтияров И.В. Критерии оценки труда по степени напряженности // Медицина труда и промышленная экология. 2019. – Т. 59. – № 9. – С. 826-827. https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-9-826-827.

18. Р 2.2.2006-05 Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда: дата введения 01.10.2005. – Москва: Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора (2005 г. (3 (21)), 2005. – 142 с.

19. Филатова И.А. Об объективной оценке напряженности труда при проведении специальной оценки условий труда в строительстве / И.А. Филатова // Балтийский морской форум: материалы VIII Международного Балтийского морского форума: в 6 т., Калининград, 05-10 октября 2020 года. Калининград: Калининградский государственный технический университет. 2020. – С. 559-562.

20. Панько Ю.В. Обоснование внедрения категоризации интеллектуальной напряженности труда // Экономика и предпринимательство. 2021. № 11(136). – С. 287-291. https://doi.org/10.34925/EIP.2021.11.136.060.

21. Холлнагель, Эрик (профессор). Две концепции безопасности: от альтернативы к синтезу: [перевод с английского языка] / Э. Холлнагель, Р.Л. Уирс, Дж. Брэйтуэйт // Методы менеджмента качества: международный ежемесячный журнал для профессионалов в области качества. Москва. – 2023. – N 9. – С. 8-15. ISSN 0130-6898.

22. Dekker, Sidney W.A. et al. «Resilience Engineering: New directions for measuring and maintaining safety in complex systems Final Report , November 2008.» (2008).

23. Gesinger, S. (2016). Experiental learning: Using Gemba walks to connect with employees. Professional Safety. 61(2), 33-37.

24. Gantt, R. (2015, February 10). A Day In the Life Of. Retrieved from http://www.safetydifferently.com/a-day-in-the-life-of/.

25. Woods, D.D., Dekker, S., Cook, R. Johannesen, L., & Sarter, N. (2010). Behind Human Error (2nd Ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.

26. Hummerdal, D. (2017, January 17). Understanding and managing Safety Differently. Retrieved from http://www.artofwork.solutions/blog/2017/1/17/5emivj92zctlo2c2fcseqyf0y9f4lp.

27. Концепция «Безопасность-II»: новый подход к достижению цели «0» // Экопси Консалтинг : сайт. – URL: https://hse-russia.ru/blog/konczepcziya-bezopasnost-ii-novyj-podhod-k-dostizheniyu-czeli-0/ (дата обращения: 23.01.2025).

28. Conklin, T. (2016). Pre-Accident Investigation: Better Questions – An Applied Approach to Operational Learning. Boca Raton, FL: CRC Press.

29. Опыт предприятий КамАЗа по развитию производственной системы и внедрению бережливого производства. Посещение производственных площадок КамАЗа // АЭФ-КОНСАЛТ: сайт. – URL: https://www.aefk.ru/delovoy-turizm/vystavki-stazhirovki/opyt-predpriyatiy-kamaza-po-razvitiyu-proizvodstvennoy-sistemy/ (дата обращения: 13.03.2025).

30. Комнаты психологической разгрузки на «КАМАЗе» // КамАЗ: сайт. – URL: https://kamaz.ru/press/news/komnaty_psikhologicheskoy_razgruzki_na_kamaze/ (дата обращения: 13.03.2025).

31. Персональные стратегии профилактики стресса. Интеграция полученных знаний // СБЕР Бизнес Live: сайт. – URL: https://sberbusiness.live/kursy/soft_skills/lesson12 (дата обращения: 13.03.2025).

32. Помощь психолога, эмоциональная разгрузка и реабилитация. Как машинисты справляются со стрессом после ЧП // Гудок: сайт. – URL: https://gudok.ru/content/social_policy/1585296/ (дата обращения: 13.03.2025).

33. Инжиниринговый дивизион Росатома представил предложения по развитию отраслевой коммуникационной платформы Atom Space // АЭС Росатом: сайт. – URL: https://ase-ec.ru/for-journalists/news/2023/apr/inzhiniringovyy-divizion-rosatoma-predstavil-predlozheniya-po-razvitiyu-otraslevoy-kommunikatsionnoy/ (дата обращения: 20.03.2025).

34. «Технический предел» в «Энергии нефтегазового сервиса» как инструмент повышения технологической эффективности и безопасности производства // Специализированный журнал «Бурение и нефть»: сайт. – URL: https://burneft.ru/archive/issues/detail.php?ELEMENT_ID=63381 (дата обращения: 21.03.2025).

35. Алексей Говзич: «Мы просто обязаны быть адаптивными» // Ведомости : сайт. – URL: https://www.vedomosti.ru/industry/outlook/characters/2025/02/26/1092256-obyazani-bit-adaptivnimi (дата обращения: 21.03.2025).

36. Здоровье под контролем «цифры». Устройства для контроля самочувствия сотрудников // Промышленные страницы: сайт. – URL: https://indpages.ru/dgtl-ctrl/zdorove-pod-kontrolem-czifry-ustrojstva-dlya-kontrolya-samochuvstviya-sotrudnikov/ (дата обращения: 21.03.2025).

37. Как крупные компании поддерживают психологическое здоровье сотрудников. Работа с ментальным состоянием // Код Дурова: сайт. – URL: https://kod.ru/supporting-psychological-health-employees (дата обращения: 21.03.2025).

Статья поступила в редакцию 15.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.83; 614.841
EDN: VOBAEZ

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВОДОРОДНОГО АВТОТРАНСПОРТА

© Автор(ы) 2025
SPIN: 4184-9948
AuthorID: 608663
ORCID: 0009-0002-8061-6771
ТОРОПКИН Александр Иванович, преподаватель кафедры практической подготовки сотрудников пожарно-спасательных формирований
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: toropkin_ai@mail.ru)
SPIN: 6101-9772
AuthorID: 833923
ORCID: 0000-0001-5661-5774
КОРОЛЕВА Людмила Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России
(196105, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 149; e-mail: koroleva.l@igps.ru)

Аннотация. В статье проведена комплексная оценка пожаровзрывобезопасности водородного автотранспорта. В основе оценки лежит метод анализа иерархических структур, разработанный Т. Саати. Приведена методика расчета. Разработана система критериев и обосновано её применение, выявлены локальные и глобальные приоритеты развития автомобильного транспорта. Определены преимущества и недостатки использования водородного топлива в сравнении с метаном и пропан-бутановой смесью. По ряду критериев, таких как «выбросы вредных веществ» и «общефизические свойства», локальные приоритеты водородного транспорта имеют больший вес по сравнению с автомобилями на сжиженных углеводородных источниках энергии. Но решающими критериями в системе приоритетов для автотранспорта оказались «стоимость жизненного цикла» и «обеспечение пожарной безопасности». В результате в системе глобальных приоритетов наибольшую перспективность в развитии имеет автомобиль, использующий метан в качестве топлива. На втором месте находятся автомобили на пропан-бутановой смеси и на третьем – водородный автотранспорт. Несмотря на это, водородному автотранспорту в настоящее время отводится предпочтение как «автомобилю с топливом будущего». Однако пожаровзрывоопасность водородного автомобильного транспорта нельзя рассматривать отдельно, не учитывая методы получения, хранения и транспортировки топлива, энергетическую эффективность, эксплуатационные затраты, экологическую безопасность и т.д. Тем самым вопросы развития необходимо решать в комплексе.

Ключевые слова: водород, метан, пропан-бутановая смесь, автомобильный транспорт, водородный транспорт, пожар, взрыв, пожаровзрывобезопасность, критерий, метод анализа иерархий.

FIRE AND EXPLOSION SAFETY ASSESSMENT SYSTEM FOR HYDROGEN VEHICLES

© The Author(s) 2025
TOROPKIN Aleksandr Ivanovich, lecturer of the Department of Practical Training of Fire and Rescue Personnel
Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: toropkin_ai@mail.ru)
KOROLEVA Ludmila Anatolyevna, doctor of technical sciences, assistant professor, professor of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Automotive Industry
Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia
(196105, Russia, St. Petersburg, Moskovsky Prospekt, 149, e-mail: koroleva.l@igps.ru)

Abstract. The article provides a comprehensive assessment of the fire and explosion safety of hydrogen vehicles. The assessment is based on the hierarchical structure analysis method developed by T. Saaty. The calculation method is given. A system of criteria has been developed and its application has been justified, local and global priorities for the development of road transport have been identified. The advantages and disadvantages of using hydrogen fuel in comparison with methane and propane-butane mixture are determined. According to a number of criteria, such as "emissions of harmful substances" and "general physical properties", the local priorities of hydrogen transport have more weight than cars powered by liquefied petroleum energy sources. But the decisive criteria in the priority system for vehicles turned out to be "life cycle cost" and "fire safety". As a result, in the system of global priorities, a car using methane as a fuel has the greatest potential for development. Propane-butane mixture vehicles are in second place, and hydrogen vehicles are in third place. Despite this, hydrogen vehicles are currently preferred as the "fuel car of the future." However, the fire and explosion hazard of hydrogen motor transport cannot be considered separately, without taking into account the methods of obtaining, storing and transporting fuel, energy efficiency, operating costs, environmental safety, etc. Thus, development issues need to be addressed in a comprehensive manner.

Keywords: hydrogen, methane, propane-butane mixture, automobile transport, hydrogen transport, fire, explosion, fire and explosion safety, criterion, hierarchy analysis method.

Для цитирования: *Торопкин А.И. Система оценки пожаровзрывобезопасности водородного автотранспорта / А.И. Торопкин, Л.А. Королева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 167-175. – EDN: VOBAEZ.*

Введение. В современном мире весьма актуальным является оценка пожаровзрывобезопасности автомобильного транспорта [1-4]. Одним из перспективных направлений является использование газообразного топлива [5-7]. Так, примерами газообразного топлива, который используется на транспорте, является метан, пропан-бутановая смесь и водород [8-10]. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с нефтью и углем в плане экологичности и энергоэффективности [11-13], хотя имеют свои особенности и специфику применения [10, 14-16].

Цели исследования – провести комплексную оценку пожаровзрывобезопасности, а также определить перспективы развития водородного автотранспорта.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1) определена система критериев, позволяющих сравнивать пожаровзрывобезопасность автотранспорта по источнику энергии;

2) представлена их сравнительная оценка с использованием метода анализа иерархий (МАИ);

3) проведена комплексная оценка пожаровзрывобезопасности автомобилей, использующих водород в качестве источника энергии и их сравнение с автомобилями, работающими на метане и пропан-бутановой смеси.

Методология. При рассмотрении автомобилей, работающих на газообразном топливе: метане (М), пропан-бутановой смеси (ПБС) в виде сжиженного углеводородного газа (СУГ) и водороде (В) возникает необходимость в их сравнении и определении направлений развития транспортной отрасли. При этом нужно выполнить сравнительную оценку комплексно, применить системный метод с возможностью учета множества факторов и выявления из них приоритетных. Это позволяет сделать метод анализа иерархических структур (МАИ), разработанный Т. Саати [17].

При реализации МАИ вначале необходимо разбить задачу на уровни и представить её в иерархической форме (рис. 1). На первом уровне (высшем) помещается общая цель – «Автомобильный транспорт», его пожаровзрывобезопасность. На втором уровне располагаются критерии пожаровзрывобезопасности (табл. 1). На третьем уровне находятся три вида топлива: метан – М, пропан-бутановая смесь – ПБС (СУГ), водород – В. Далее следует определение критериев, графическое представление иерархии, попарное сравнение и оценка.

Для осуществления субъективных сравнений между парами объектов была использована индексная шкала от 1/9 до 9, описанная в таблице 2. Эта система оценки оказалась действенной не только в различных сферах применения, но и получила теоретическое обоснование своей состоятельности в сравнении с другими шкалами [17]. Она весьма эффективна в интерпретации полученных с её помощью численных результатов.

Для определения сравнительной оценки (важности) составляем и заполняем матрицу, элементами которой являются индексы от 1/9 до 9, для второго уровня иерархии (табл. 3). Тем самым устанавливается характер суждений относительно общей цели – пожаровзрывобезопасность автомобиля.

На следующем уровне иерархии создаются новые матрицы, для 8 критериев получается 8 матриц третьего уровня (табл. 4).

Принцип иерархической непрерывности постулирует императивное требование к элементам каждого уровня иерархической структуры, заключающееся в их последовательном бинарном сопоставлении с элементами вышестоящих уровней вплоть до достижения вершины иерархии. Данный методологический подход направлен на установление приоритетов элементов на верхнем уровне, которые наиболее точно и адекватно отражают их относительное влияние на вершину иерархической системы. Это позволяет обеспечить когерентность и логическую целостность всей иерархической конструкции, а также способствует более эффективному и обоснованному принятию решений на всех уровнях.

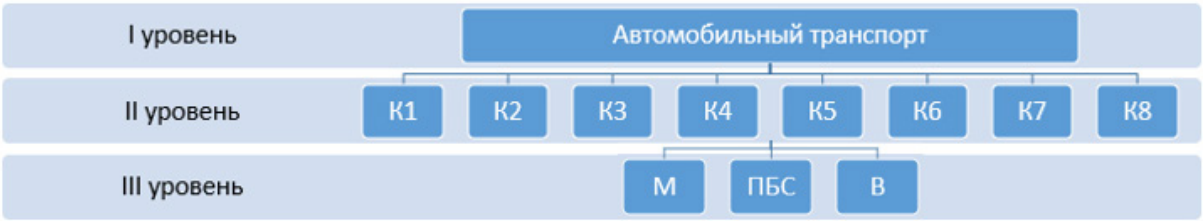


Рисунок 1 – Уровни в МАИ

Таблица 1 – Краткая расшифровка критериев 2-го уровня

Критерий	Расшифровка критерия
К1 – Общефизические свойства (ОФС)	Основные физические свойства, влияющие на пожаровзрывоопасность (температуры фазовых переходов, диффузия, теплопроводность, текучесть и др.).
К2 – Воспламеняемость и горючесть топлива (ВГТ)	Способность веществ и материалов к развитию горения (концентрационные пределы распространения пламени, температура самовоспламенения, температура воспламенения и т.д.).
К3 – Способность к взрыву и детонации (СВД)	Основные показатели взрывоопасности (максимальное давление взрыва, мощность, скорость детонации, чувствительность к внешним воздействиям и т.д.).
К4 – Стоимость жизненного цикла транспорта, эксплуатационные свойства и энергоэффективность (СЖЦ)	Совокупные издержки потребителя на приобретение и использование техники за срок её службы. Способность транспортного средства преодолевать определённое расстояние за счёт меньшего расхода энергии (м/Дж).
К5 – Процессы обеспечения пожарной безопасности (ППБ) автотранспорта	Наличие и доступность технологий, процессов обеспечения пожарной безопасности (ПБ) получения, хранения и распределения топлива (насколько разработаны внутреннее оборудование и связанные с ним процессы безопасности).
К6 – Обеспечение пожарной безопасности инфраструктуры (ПБИ) автотранспорта	Инфраструктура и её проработанность с точки зрения обеспечения ПБ, развитость инфраструктуры (АЗС, места хранения, производства, распределения и др.).
К7 – Проработанность нормативной базы по пожаровзрывобезопасности (ПНБ)	Насколько изучена, разработана, описана, опробована нормативная база по обеспечению пожаровзрывобезопасности.
К8 – Выбросы вредных веществ при пожаре (ВВВ)	Выбросы, характеризующие воздействие автотранспорта, топлив и продуктов их сгорания на человека и окружающую среду при пожаре.

Таблица 2 – Относительная шкала сравнения объекта А (горизонтального) с объектом В (вертикальным)

9 – А по значимости абсолютно превосходит В	1/9 – В по значимости абсолютно превосходит А
8 – промежуточное значение	1/8 – промежуточное значение
7 – А явно важнее В	1/7 – В явно важнее А
6 – промежуточное значение	1/6 – промежуточное значение
5 – А значительно важнее В	1/5 – В значительно важнее А
4 – промежуточное значение	1/4 – промежуточное значение
3 – А незначительно важнее В	1/3 – В незначительно важнее А
2 – промежуточное значение	1/2 – промежуточное значение
1 – А и В одинаково важны	

Таблица 3 – Таблица матрицы сравнения критериев по важности для автотранспорта.

Значимость для автотранспорта	К1-ОФС	К2-ВГТ	К3-СВД	К4-СЖЦ	К5-ТПБ	К6-ПБИ	К7-ПНБ	К8-ВВВ
К1-ОФС	1							
К2-ВГТ		1						
К3-СВД			1					
К4-СЖЦ				1				
К5-ТПБ					1			
К6-ПБИ						1		
К7-ПНБ							1	
К8-ВВВ								1

Таблица 4 – Таблица матрицы сравнения автомобилей с различным топливом (М, ПБС и В) относительно критериев 2 уровня (в качестве примера приведены две таблицы для критериев К1 и К2)

К1 – Общефизические свойства (ОФС)

К1-ОФС	М	ПБС	В
М	1		
ПБС		1	
В			1

К2 – Воспламеняемость и горючесть топлива (ВГТ)

К2 – ВГТ	М	ПБС	В
М	1		
ПБС		1	
В			1

Результаты. В данном разделе представлены примеры заполнения матриц парных сравнений и итоговые результаты, полученные на их основе (рис. 2, 3). На основе группы матриц парных сравнений формируется набор локальных приоритетов, который демонстрирует степень влияния различных элементов на элемент, расположенный на вышестоящем уровне иерархии. Для определения относительной важности, предпочтительности или вероятности каждого объекта производится решение матриц, обладающих свойством обратной симметрии. В процессе решения вычисляется спектр собственных векторов для каждой матрицы, после чего осуществляется нормирование результата для получения вектора приоритетов.

В дополнение к матрице сравнений существует индикатор уровня несоответствия согласованности. Если эти отклонения выше допустимых нормативов, лицу, проводящему оценку, рекомендуется повторно проверить свои суждения, отраженные в матрице.

Индекс согласованности (ИС) для отдельной матрицы и всей иерархической структуры возможно приближенно рассчитать вручную. Для выполнения данной операции необходимо просуммировать все значения в каждом столбце матрицы, затем умножить сумму значений первого столбца на величину первой компоненты нормализованного вектора приоритетов, сумму значений второго столбца – на величину второй компоненты и так далее. Полученные результаты следует суммировать, что приведет к вычислению наибольшего собственного значения λ_{max} (СЗ) матрицы суждений. Для определения ИС применяется следующая формула:

$$ИС = (\lambda_{max} - n) / (n - 1),$$

где n – количество элементов для сравнения. Для матриц, обладающих свойством обратной симметрии $\lambda_{max} \geq n$.

После этого сопоставим данный показатель с тем, который был бы получен при использовании случайного отбора количественных оценок из последовательности 1/9, 1/8, 1/7, ... , 1/2, 1, 2 ... 9, при формировании матрицы.

Ниже представлены средние показатели согласованности для матриц, которые были сгенерированы случайным образом и имеют различное количество элементов (табл. 5).

Рисунок 2 – Пример заполнения матрицы значимости критериев второго уровня

Рисунок 3 – Пример заполнения матрицы сравнения автомобилей, работающих на различных видах газообразного топлива относительно К2 – Воспламеняемость и горючесть топлива (ВГТ)

Таблица 5 – Случайная согласованность в зависимости от размера матрицы

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Случайная согласованность	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

В случае разделения индекса согласованности (ИС) на значение, которое соответствует уровню случайной согласованности (СС) матрицы той же размерности, можно вычислить отношение согласованности (ОС). Оптимальное значение ОС должно находиться в пределах 10%, однако в некоторых случаях допустимо повышение до 20%. При выходе полученного значения ОС за указанные пределы, участникам следует провести детальный анализ задачи и проверить обоснованность сделанных предположений [17].

Вес критерия V_i или приоритет, СЗ, ИС и ОС вычисляли в соответствии с установленной методикой [17].

Обобщенные значения приоритета представлены на рисунке 4. В системе приоритетов критерий «К3 – Способность к взрыву и детонации (СВД)» занимает четвертое место (значение V_i составляет 9,06%) после критериев «К4 – Стоимость жизненного цикла транспорта, эксплуатационные свойства и энергоэффективность (СЖЦ)», «К5 – Процессы обеспечения пожарной безопасности (ППБ) автотранспорта» и «К6 – Обеспечение пожарной безопасности инфраструктуры (ПБИ) автотранспорта» (значения V_i составляют 31,88%, 22,32%, 17,21% соответственно). Критерий «К2 – Воспламеняемость и горючесть топлива (ВГТ)» незначительно уступает (значение V_i = 6,89%). На последнем месте критерии «К1 – Общефизические свойства (ОФС)» и «К8 – Выбросы вредных веществ в окружающую среду (ВВВ)» (4,34% для этих приоритетов).

Приведем в качестве примера итоговую оценку весовых показателей автотранспорта по критерию «К2 – Воспламеняемость и горючесть топлива (ВГТ)» (рис. 5). Наибольшим локальным приоритетом (с отрывом от остальных) обладает автомобиль, работающий на пропан-бутановой смеси (54%). На втором месте автомобиль на метане (30%). Наименьшую долю приоритета составляет автомобиль с водородным двигателем (16%). Представляется, что данная ситуация обусловлена высокой степенью взрыво- и пожароопасности водорода, а также наличием нерешенных проблем, связанных с предотвращением утечек и обеспечением дополнительных мер безопасности. Аналогично составляются остальные семь локальных приоритетов для автомобилей по другим критериям.

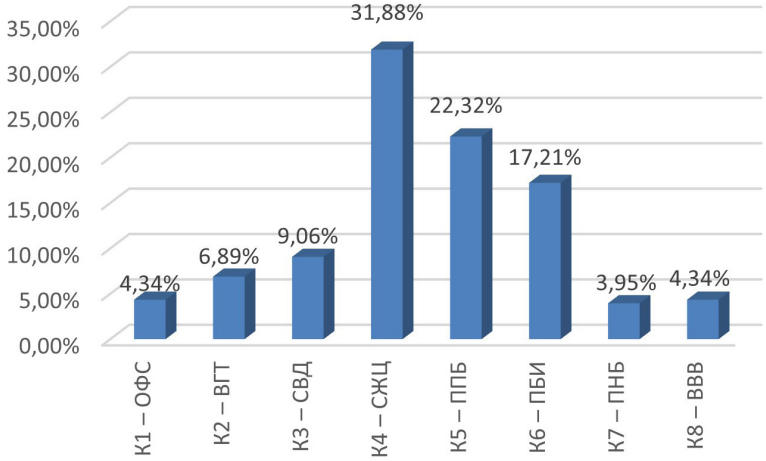


Рисунок 4 – Итоговые значения приоритетов автотранспорта (второй уровень)

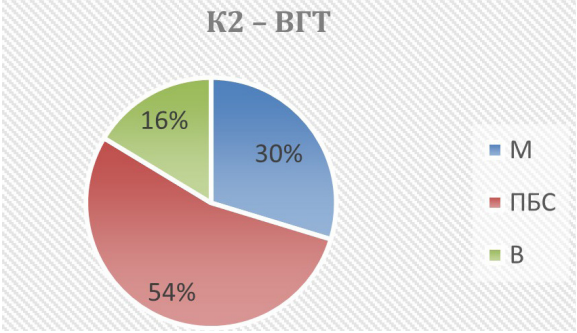


Рисунок 5 – Итоговый анализ весовых характеристик автотранспортных средств по установленному критерию «К2 – Воспламеняемость и горючесть топлива (ВГТ)»

Сравнивая локальные приоритеты по «К8 – Выбросы вредных веществ в окружающую среду (ВВВ)», отметим существенное преимущество водородного топлива (70%). Современные достижения в области химической технологии предоставляют автомобильному транспорту альтернативные виды топлива, которые направлены на снижение негативного воздействия на экологию. В таблице 6 представлены сравнительные данные о водороде, метане, пропане и бутане как видах топлива для автомобилей [18].

После создания матриц приоритетов можно перейти к обобщению. Для определения глобальных приоритетов автомобилей в матрице необходимо сопоставить локальные приоритеты с каждым критерием. Затем следует выполнить умножение каждого столбца векторов на соответствующий локальный приоритет критерия и суммировать построчно (табл. 7). В качестве примера для автомобиля на метане (М) имеем:

(0,30*0,04) + (0,3*0,07) + ... + (0,19*0,04) = 0,43

Расчет глобальных приоритетов и выявление перспектив по представленным в таблице 1 критериям, позволили получить следующие результаты, отраженные в таблице 7 и на рисунке 6. Максимальный приоритет (43,28%) принадлежит автомобилю на метане (М). Следующий (33,86%) занимает автомобиль на пропан-бутановой смеси (ПБС). Автомобили, работающие на водороде (В), занимают третью позицию в системе глобальных приоритетов (22,87%).

Рисунок 6 – Глобальные приоритеты пожаровзрывобезопасности автомобилей на метане (М), пропан-бутановой смеси (ПБС) и водороде (В)

Таблица 6 – Характеристики водорода, метана, пропана и бутана как видов топлива для автомобилей [18]

Характеристика	Водород	Метан	Пропан	Бутан
Химическая формула	H_2	CH_4	C_3H_8	C_4H_{10}
Температура, К: плавления кипения	 13 20	 91 111	 36,5 231	 135 272,5
Плотность при нормальных условиях, кг/м^3	70,6	423	582	580
Теплота сгорания (низшая): ГДж/кг кДж/м^3	 120,2 8,54	 50,0 21,2	 46,5 27,2	 45,8 27,18
Стехиометрический расход воздуха, кг/кг	34,5	17,2	15,6	15,5
Удельный выброс, 10^5 кг/кДж: оксидов азота оксида углерода углеводородов	 2,88 0 0	 3,49 92,2 2,3	 3,06 77,9 1,7	 3 85 3

Таблица 7 – Обобщенные (глобальные) приоритеты (ОП)

	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	К8	ОП
	0,04	0,07	0,09	0,32	0,22	0,17	0,04	0,04	
М	0,30	0,30	0,63	0,49	0,49	0,32	0,28	0,19	0,43
ПБС	0,16	0,54	0,29	0,31	0,20	0,56	0,63	0,11	0,34
В	0,54	0,16	0,08	0,20	0,31	0,12	0,09	0,70	0,23

Обсуждение. Кратко обсудим интересующие нас виды газообразного топлива.

Водород (*H*) – самый легкий и часто встречающийся элемент в космосе, основная часть звёзд и межзвёздного газа. На Земле в основном встречается в газообразной форме (H_2), в составе воды (H_2O), углеводородов и многих других соединений. Водород применяют во многих сферах: в производстве аммиака и удобрений, хлороводорода, соляной кислоты, метанола, а также в качестве топлива. Из-за отсутствия вредных выбросов парниковых газов его называют экологичным источником энергии, который используют в транспортной инфраструктуре, снижая зависимость от ископаемых углеводородов. Однако, чтобы водород стал широко используемым видом топлива, необходимо инвестировать значительные ресурсы в развитие инфраструктуры, которая будет обеспечивать производство, транспортировку, хранение и использование водорода. Кроме того, необходимо обеспечить безопасность при работе с этим веществом [19-20].

Метан (CH_4) – основной компонент природного

газа, применяемый в качестве транспортного топлива. Его обычно хранят в виде сжатого газа (компримированный природный газ, КПГ) или в виде жидкости (сжиженный природный газ, СПГ). КПГ и СПГ – это два разных способа хранения метана. При хранении КПГ газ остается в своем первоначальном газообразном состоянии, но находится под высоким давлением в специальных баллонах, которое может достигать от 200 до 250 атмосфер. СПГ, с другой стороны, хранится в сжиженном виде в емкостях и баллонах, оснащенных криогенной установкой для поддержания очень низкой температуры – около -160°C. Благодаря этому процессу объем газа уменьшается в 600 раз, а вес – в два раза по сравнению с его газообразным состоянием. Основное различие между двумя способами хранения метана заключается в условиях. Компримированный природный газ (КПГ) хранится при температуре окружающей среды и высоком давлении. Сжиженный природный газ (СПГ), напротив, при низкой температуре и давлении, близком к атмосферному. Метан как автомобильное топливо имеет множество преимуществ: он в 2-3 раза дешевле бензина и более экологичен. При сгорании метан выделяет гораздо меньше углекислого газа, чем бензин или дизель. Кроме того, он легко смешивается с воздухом, обеспечивая равномерное заполнение цилиндров. Также стоит отметить, что метан в два раза легче воздуха, поэтому в случае утечки он быстро улетучится, не успев взорваться. Однако использование метана в автомобилях сопряжено с некоторыми сложностями. Например, баллон для этого газа имеет очень толстые стенки и большой вес. Из-за этого газобаллонное оборудование (ГБО) на метане чаще всего устанавливают на грузовые автомобили [21-22].

Пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}) – углеводороды, находящиеся при нормальных условиях в виде газа. Для оптимизации процессов хранения и транспортировки их подвергают процессу сжижения, в результате чего получается сжиженный углеводородный газ (СУГ). Благодаря своим физико-химическим характеристикам, включая высокую теплотворную способность и безопасное хранение, пропан представляет собой предпочтительный выбор для широкого спектра бытовых и промышленных целей. Так, пропаном заправляют бытовые газовые баллоны, которые применяют в отоплении и приготовлении пищи. Бутан же чаще всего используется в автомобилях с газобаллонным оборудованием (ГБО) для заправки. Использование пропан-бутановой смеси имеет множество преимуществ: она дешевле бензина и дизельного топлива; обладает высоким октановым числом, что делает ее более эффективной для двигателей; снижает износ двигателя и уменьшает нагар, что способствует более мягкой работе; снижает вероятность детонации, обеспечивая стабильную работу; автомобиль на газе выбрасывает в окружающую среду меньше вредных веществ, чем бензиновые или дизельные двигатели. Однако стоит помнить, что пропан и бутан относятся к опасным горючим веществам, а пропан также может быть взрывоопасен. Поэтому при их использовании необходимо строго соблюдать правила техники безопасности [21-22].

Оценивая автомобильное топливо, принимались во внимание не только его физико-химические характеристики, но и другие аспекты и критерии. Среди них: количество и доступность запасов; стоимость сырья для производства; безопасность при производстве и использовании; эффективность транспортировки; влияние на окружающую среду; хранении в условиях воздействия кислорода и влаги; токсичность топлива при сгорании; энергоэффективность, коэффициент полезного действия (КПД). По всем этим параметрам водород сопоставим с углеводородным топливом. Оценка показала, что водородный транспорт занимает третье место в системе глобальных приоритетов. Но по ряду локальных приоритетов он лидирует. Многие направления требуют решения и применения развития технологий.

Несмотря на ряд преимуществ автомобили на водороде имеют ряд проблем в широком применении. Так, например, в топливном баке современного автомобиля содержится 55,3 кг бензина, что позволяет преодолеть расстояние в 500 км. Этот объем топлива эквивалентен 21 кг водорода, размещенного в двух сосудах Дьюара, каждый из которых имеет емкость 150 л. Общий вес сосудов составляет 300 кг, а их суммарный объем равен 608 л [1-3]. При проектировании криогенного резервуара ключевым фактором является ограничение на испарение жидкого водорода. Допустимый уровень испарения в сутки составляет 1% от массы загруженного топлива, что создает дополнительные риски и снижает общую эффективность применения топлива. Существует ещё множество нерешенных вопросов, связанных с использованием водорода, что и привело к 3-му месту в системе глобальных приоритетов.

Данное исследование подтверждает результаты, описанные в работах [1-3, 10, 23]. Они являются продолжением исследования [24]. В отличие от работ других авторов по данной тематике [1-4] в предоставленной статье применен системный подход, в основе которого стоит метод анализа иерархий [17, 25, 26].

Поскольку автомобили на газомоторном топливе, в т.ч. на водородном, подвержены риску пожара и взрыва топливо-воздушной смести (ДТП, неисправность оборудования и т.п.), существуют различные методы пожаровзрывозащиты. Так пассивная защита направлена на увеличение огнестойкости топливной магистрали, использование огнезащитного материала и ограничение подачи водорода. Активная противопожарная защита состоит в установке огнетушителей различного

вида. Также возможно использование автомобиля азотного тушения [2]. Чтобы обнаружить возгорание, применяют тепловизоры.

Проблема пожаровзрывоопасности автомобилей на водородном топливе стоит особенно остро, если они находятся в закрытых паркингах, поскольку взрыв водородно-воздушной смести и последующий пожар («огненный шар») там особенно опасны. Поэтому автомобили на водородном топливе важно автоматически идентифицировать при въезде в такие зоны с помощью специальных знаков и маркировок. Для обнаружения опасной водородно-воздушной смеси возможно применять токсиметры. А облако с опасными концентрациями водорода выдувать, используя мобильные вентиляторы. Тем самым можно значительно уменьшить вероятность возникновения пожара и взрыва топливо-воздушной смести.

Выводы. В работе проведено исследование пожаровзрывобезопасности автомобилей, использующих в качестве топлива различные источники энергии (метан, пропан-бутановая смесь, водород), в сравнении восьми критериев. Для того чтобы применить системный подход к анализу перспектив развития автомобильного транспорта на газовом топливе, была разработана система критериев МАИ. С помощью этой системы было определено взаимное влияние и установлены приоритеты для рассматриваемых критериев.

Критерий «Стоимость жизненного цикла транспорта, эксплуатационные свойства и энергоэффективность» занимает первое место в системе приоритетов, за ним следуют «Процессы обеспечения пожарной безопасности автотранспорта» и «Обеспечение пожарной безопасности инфраструктуры автотранспорта».

Оценивая автотранспорт с точки зрения «Стоимость жизненного цикла транспорта, эксплуатационные свойства и энергоэффективность» первое место принадлежит автомобилю на метане (49%), второе – на пропан-бутановой смеси (31%) и третье – на водороде (20%). Однако по критерию «Выбросы вредных веществ в окружающую среду» двигатель на водороде значительно лидирует (70%).

Рассматривая систему глобальных приоритетов, наибольшая перспектива принадлежит автомобилю на метане. Далее следуют автомобили на пропан-бутановой смеси и водородный автотранспорт соответственно. Однако, несмотря на невысокие оценки автомобиля на водороде, на сегодняшний день ему отводится предпочтение как «автомобилю с топливом будущего».

Пожаровзрывоопасность водородного автомобильного транспорта нельзя рассматривать отдельно, не учитывая методы получения, хранения и транспортировки топлива, энергетическую эффективность, эксплуатационные затраты, экологическую безопасность и т.д. Тем самым вопросы развития необходимо решать в комплексе. Особо следует отметить проблему пожаровзрывоопасности автомобилей на водородном топливе, особенно в закрытых паркингах, из-за образования опасной концентрации топливо-воздушной смести, которую можно решать с помощью пассивной и активной защиты, а также применяя мобильные токсиметры и вентиляторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Анализ безопасности использования в автомобилях углеводородных топлив и водорода / А.В. Порсин, С.Г. Цариченко, Ю.А. Добровольский [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 10. – С. 1508-1519.

2. Елтышев И.П. и др. Оценка эффективности способов обеспечения пожаровзрывобезопасности транспорта на водородном топливе //Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – №. 2. – С. 19-26.

3. Aneziris O. et al. Safety guidelines and a training framework for LNG storage and bunkering at ports //Safety Science. – 2021. – Т. 138. – С. 105212.

4. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н. Пожарная безопасность объектов инфраструктуры транспорта на водородном топливе // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – №. 2. – С. 41-51.

5. Коноплев В.Н. Безопасность водородной энергетики применительно к автотранспортному процессу на газомоторных топливах //Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – №. 5 (29). – С. 61-66.

6. Bhuiyan M.M.H., Siddique Z. Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Т. 102. – С. 1026-1044.

7. Трофименко Ю.В. и др. Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации //Научный вестник МГТУ ГА. – 2025. – Т. 28. – №. 1. – С. 78-96.

8. Галдин В. Горючие газы. Добыча, транспортировка, получение. – Litres, 2024.

9. Ahmad S. et al. Hydrogen production, storage, transportation and utilization for energy sector: A current status review // Journal of Energy Storage. – 2024. – Т. 101. – С. 113733.

10. Ardila-Suarez C. et al. Consequence Analysis of LPG-Related Hazards: Ensuring Safe Transitions to Cleaner Energy // Fuels. – 2025. – Т. 6. – №. 2. – С. 45.

11. Hren R. et al. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Т. 173. – С. 113113.

12. Min M. et al. Hydrogen Risk Assessment Studies: A Review Toward Environmental Sustainability // Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 2. – С. 229.

13. Ghorbani B., Zendehboudi S., Saady N.M. C. Advancing Hybrid Cryogenic Natural Gas Systems: A Comprehensive Review of Processes and Performance Optimization //Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 6. – С. 1443.

14. Wang B. et al. Safety evaluation on hydrogen leakage and combustion of high-pressure hydrogen dispenser //International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Т. 72. – С. 1010-1022.

15. Sürer M.G., Arat H.T. Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47. – №. 45. – С. 19865-19875.

16. Yang F. et al. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process //International journal of hydrogen energy. – 2021. – Т. 46. – №. 61. – С. 31467-31488.

17. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем: пер. с англ. Вачнадзе Р.Г. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

18. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд./Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова; под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия, 1989. – 672 с.

19. Markowska K. et al. Hydrogen-Powered Engines: A Study on Selected Technological and Emissions Issues //Energies.

– 2025. – Т. 18. – №. 7. – С. 1675.

20. Шебеко Ю. Н. Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики //Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29. – №. 5. – С. 5-12.

21. Вогман Л.П., Зуйков В.А., Зуйков А.В., Простов Е.Е. Пожароопасность газобаллонных автомобилей // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2022. – № 1 (11). – С. 11-22.

22. Huffman M. et al. A comparative bibliometric study of the transport risk considerations of liquefied natural gas and liquefied petroleum gas //The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2024. – Т. 102. – №. 6. – С. 2019-2038.

23. Zöldy M. et al. A Comprehensive Analysis of Characteristics of Hydrogen Operation as a Preparation for Retrofitting a Compression Ignition Engine to a Hydrogen Engine //Processes. – 2025. – Т. 13. – №. 3. – С. 718.

24. Торопкин А.И., Королева Л.А. Оценка пожаровзрывобезопасности водородного транспорта на основе моделирования процессов горения водорода // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. №. 1. – С. 190-201. DOI: https://doi.org/10.61260/1998-8990-2025-1-190-201.

25. Профессиональная подготовка в вузах / под ред. Синевой Н.К., Ушаковой Л.Н. М.: Норма, 2016. – 249 с.

26. Королева, Л.А. Оценка пожарной опасности и перспективы развития локомотивной тяги с использованием системного подхода метода анализа иерархий / Л.А. Королева, Г.К. Ивахнюк, И.Г. Малыгин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 2(66). – С. 135-147.

Статья поступила в редакцию 04.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.842.66
EDN: UMJIQN

ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОДУЛЬНЫХ АРКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© Авторы 2025

SPIN:1076-8133
Author ID: 664653
ORCID: 0000-0003-1561-2483
Researcher ID: K-2087-2018

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник Высшей школы РФ,
заведующий лабораторией «Проблем безопасности транспортных систем»
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН
(199178, Россия, Санкт-Петербург, 12-я Линия Васильевского Острова, д.13)

SPIN:4379-6230
ORCID 0000-0002-4424-2840

ИЩЕНКО Андрей Дмитриевич, доктор технических наук,
профессор кафедры «Организации деятельности пожарной охраны»
учебно-научного комплекса «Систем обеспечения пожарной безопасности»
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
(129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д.4)

SPIN:7545-7245
ORCID 0000-0003-3605-373X

ТАРАНЦЕВ Андрей Александрович, кандидат технических наук,
преподаватель кафедры «Пожарной тактики и службы»
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
(129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д.4)

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые аспекты обеспечения пожарной безопасности модульных объектов, эксплуатируемых в арктических условиях, характеризующихся экстремально низкими температурами, сильными ветрами и ограниченной транспортной доступностью. Особое внимание уделено анализу существующих методов тушения пожаров в таких модулях, включая их преимущества и недостатки. Традиционные способы, такие как применение пены, воды или химических огнетушащих веществ, оказываются малоэффективными из-за замерзания оборудования и сложностей с обслуживанием и доставкой ресурсов. Цель статьи – рассмотрение инновационного подхода к подавлению пожаров в арктических модулях. Методология подхода – использование низкотемпературного воздуха для продувки внутреннего объема модуля с одновременной дозированной подачей снега. Это позволяет эффективно справиться с задачей – локализовать и потушить возгорание, минимизируя риски для конструкции и персонала, а также позволяет пожарному расчёту работать внутри модуля под защитой низкотемпературной струи. Технические особенности реализации данного способа подтверждены компьютерным и модельным экспериментами и запатентованы. В выводах приведены его преимущества в условиях Арктики, а также перспективы применения в модульных объектах, функционирующих в экстремальных климатических условиях Арктики.

Ключевые слова: Арктика, модульные объекты, пожары, низкие температуры, способы тушения.

APPLIED ISSUES OF MODELING FIRE PROTECTION SYSTEMS USING MARKOV CHAINS

© Authors 2025

TARANTSEV Alexander Alekseevich, doctor of technical sciences, professor,
honored worker of the Higher School of the Russian Federation,
head of the Laboratory "Problems of Safety of Transport Systems"
N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
(199178, Russia, St. Petersburg, 12th Line of Vasilievsky Island, 13),

ISHCHENKO Andrey Dmitrievich, doctor of technical sciences,
professor of the Department of Fire Protection Organization
at the Educational and Scientific Complex of Fire Safety Systems
Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia
(*129366, Russia, Moscow, Borisa Galushkina str., 4*)

TARANTSEV Andrey Alexandrovich, candidate of technical sciences,
lecturer at the Department of Fire Tactics and Service
Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia
(*129366, Russia, Moscow, Borisa Galushkina str., 4*)

Abstract. The article examines key aspects of ensuring fire safety of modular facilities operated in arctic conditions

characterized by extremely low temperatures, strong winds and limited transport accessibility. Particular attention is paid to the analysis of existing methods of extinguishing fires in such modules, including their advantages and disadvantages. Traditional methods, such as the use of foam, water or chemical extinguishing agents, are ineffective due to freezing of equipment and difficulties with maintenance and delivery of resources. The purpose of this article is to explore an innovative approach to extinguishing fires in Arctic modules. The approach involves using low-temperature air to purge the interior of the module while simultaneously dispensing snow in a controlled manner. This approach effectively addresses the challenge of localizing and extinguishing fires while minimizing risks to the structure and personnel, allowing firefighters to work inside the module under the protection of the low-temperature stream. The technical features of this method have been confirmed by computer and model experiments and have been patented. The conclusions include its advantages in the Arctic, as well as the prospects for its use in modular facilities operating in the extreme climatic conditions of the Arctic.

Keywords: Arctic, modular facilities, fires, low temperatures, firefighting methods.

Для цитирования: *Таранцев А.А. Об обеспечении пожарной безопасности модульных арктических объектов / А.А. Таранцев, А.Д. Ищенко, А.А. Таранцев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 176-182. – EDN: UMJIQN.*

Введение. Освоение Арктической зоны (АЗ) Российской Федерации и территорий Крайнего Севера (КС) представляет собой одно из приоритетных направлений государственной политики России, что закреплено в соответствующих нормативных документах [1-12] и научных исследованиях, в т.ч. с участием авторов [13-19]. Значение этого процесса обусловлено несколькими факторами. Во-первых, регионы АЗ и КС обладают огромными запасами природных ресурсов, что подчеркивается в федеральном законодательстве. Во-вторых, развитие транспортной инфраструктуры, включая Северный морской путь (СМП), играет ключевую роль в укреплении экономического потенциала страны. В-третьих, активное присутствие в Арктике необходимо для защиты геополитических и экономических интересов России в этом стратегически важном регионе. Успешное освоение Арктики способствует не только экономическому росту, но и укреплению позиций страны на международной арене, обеспечивая устойчивое развитие и безопасность.

В российской АЗ и на КС планируется активное возведение объектов различного назначения, включая добывающие станции, гидрометеорологические и научные комплексы, радиолокационные станции, портовые сооружения и инфраструктуру оборонного значения. Особенности сурового климата этих регионов, такие как экстремально низкие температуры (до -60°С), сильные ветры, снежные заносы, продолжительная полярная ночь и вечная мерзлота [34], диктуют необходимость использования модульных конструкций для строительства (рис. 1*а,б*). Такие объекты отличаются повышенной устойчивостью к агрессивным природным условиям и обеспечивают функциональность в сложной арктической среде.

Арктические модули – цилиндрический универсальный блок (ЦУБ) (рис. 1*в*) и более современный октагонный (рис. 1*г*) относятся к различным подклассам функциональной пожарной опасности (ФПО) [20] – жилые (общежития, казармы) Ф1.2, спортивные блоки Ф2.1, пищеблоки Ф3.2, санчасти Ф3.4, бани и сауны Ф3.6, диспетчерские и пультовые Ф4.3, модули производственного назначения (мастерские, энергомодули и т.п.) Ф5.1, складские модули (для продовольствия, запчастей, ГСМ и т.п.), хозблоки, гаражи Ф5.2, а в ряде случаев и пожарные депо Ф4.4. Модули выполнены максимально компактными, утеплёнными и автономными.

В отличие от помещений и зданий аналогичных подклассов ФПО в районах с умеренным климатом, модули имеют повышенную энергонасыщенность, т.е. отношение обращающейся в них электрической мощности, расходуемой на работу оборудования, отопление и др., к объёму модуля. Как показано в брошюре [13] и монографии [14], энергонасыщенность арктического модуля более чем на порядок (!) выше энергонасыщенности помещений аналогичного назначения в умеренном климатическом поясе.

Это, в свою очередь, обусловливает повышенный риск возникновения пожаров [33], что отмечено в Методике [21]. А пожар в модулях арктических объектов, если не подавить горение на самом начальном этапе, помимо собственно повреждения его конструкции, опасен следующими последствиями:

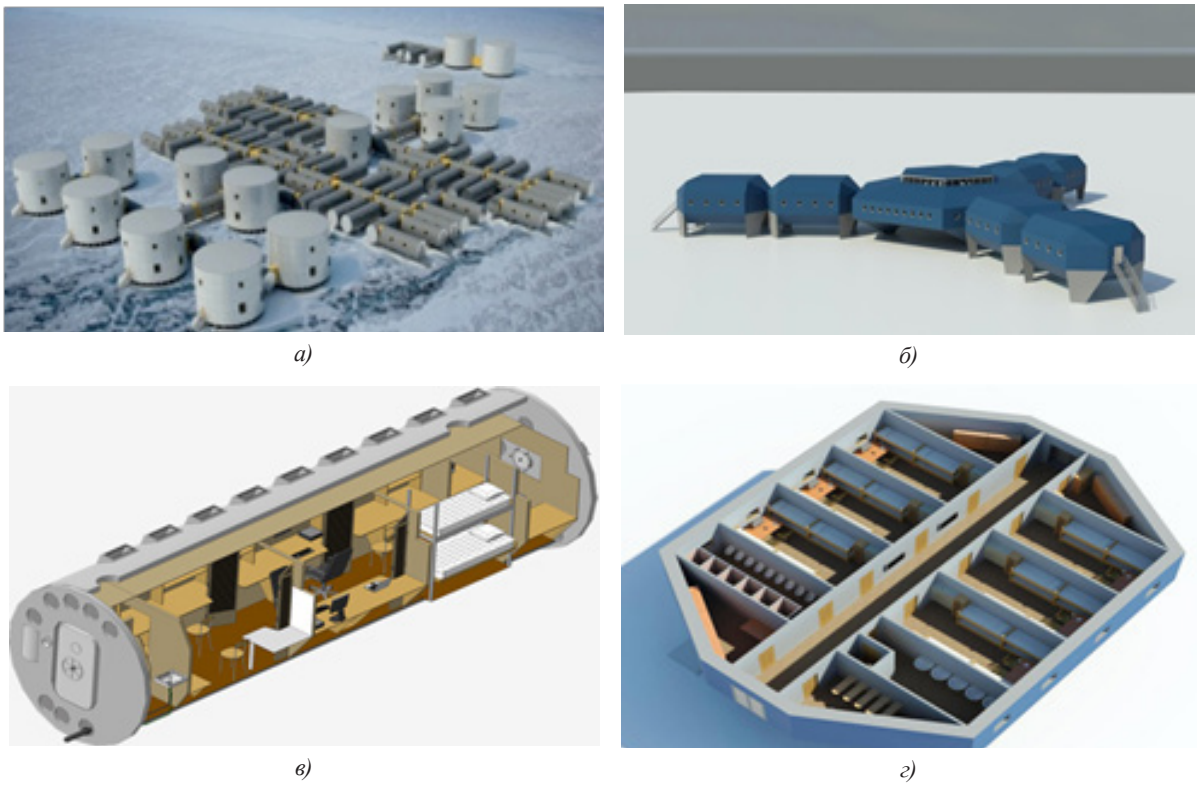
– угроза жизни и здоровью персонала, отдыхающему (спящему) в жилом модуле;

– выход из строя целевой аппаратуры вплоть до потери функций самого объекта, например, прекращение работы РЛС [34];

– при пожаре энергомодуля может быть обесточен объект, что, во-первых, парализует его функции, во-вторых, прекратится теплоснабжение модулей, что приведёт к риску замерзания персонала, если не будет оказана срочная помощь извне;

– риск возникновения локальной ЧС (в т.ч. экологического характера [19]) при возгорании склада ГСМ;

– риск возникновения крупной (трансграничной) ЧС при возгорании энергомодуля с мощной энергоустановкой.



а) *б)* *в)* *г)*

Рисунок 1 – Модульные объекты в АЗ (а, б) и виды модулей – ЦУБ (в) и октагонный (г) [14]

Ввиду больших расстояний как между объектами, так и до Арктических спасательных центров [8] МЧС России, а также из-за частой нелётной погоды оперативно помощь пострадавшему объекту оказана быть не может.

Методология. Исследование способов тушения пожаров модулей арктических объектов показывает, что тушение может осуществляться:

– традиционным способом – подачей воды (её растворов, с пониженной температурой замерзания) стволами от специализированных автоцистерн (АЦ) [14];

– автоматическими установками пожаротушения (АУП) [22];

– продувкой горящего объёма низкотемпературным наружным воздухом [14-17] с учётом рекомендаций [23] и организацией дозированной подачи снега (воды) [36] в воздушную струю [34] (это будет подробно рассмотрено в следующем разделе).

Традиционный способ тушения помещения в условиях низких температур посредством подачи воды (её растворов) стволами от АЦ представляет значительную сложность (рис. 2) и осуществляется в соответствии с положениями Пожарной тактики [24] и Боевого устава пожарной охраны [25] (БУПО).

Применение [34] традиционных методов тушения пожаров [37] на объектах АЗ сталкивается с рядом серьезных ограничений. Во-первых, необходима специализированная пожарная техника, адаптированная к экстремальным условиям [34], например, автомобиль «АЦ-СЕВЕР» в исполнении ХЛ АЦ-(С)-8.0-70/100 48ВР с дизельным двигателем мощностью 420 л.с. и массой 28 тонн, способный работать при температурах до -60°С.

а) *б)* *в)*

Рисунок 2 – Сложность тушения пожаров в условиях низких температур (а – пожароопасность модулей, б – работа пожарной техники, в – переохлаждение пожарных при длительном тушении) [14, 35, 37]

Однако стоимость такой техники превышает 25 млн рублей [14]. Во-вторых, для ее хранения требуется отапливаемое депо с запасами воды в жидком состоянии и необходимыми запчастями. В-третьих, эксплуатация техники требует квалифицированного персонала. Кроме того, двигатель пожарного автомобиля должен постоянно прогреваться, что влечет значительный расход топлива. В условиях снежных заносов доступ к горящему модулю затруднен, а использование воды для тушения может повредить электрооборудование [34], вызывая обледенение и приводя модуль [34] в неремонтопригодное состояние. Таким образом, применение специализированных пожарных автомобилей в АЗ ограничено крупными объектами и связано с высокими затратами.

Для тушения пожаров в помещениях известны модульные АУП, имеющие меньшую стоимость по сравнению с вышеприведённым способом и нашедшие широкое применение на различных объектах. Однако и АУП имеют недостатки применительно к арктическим модулям (табл. 1), в частности. они неприменимы в жилых модулях (класс ФПО Ф1.2), т.к. ложное срабатывание представляет опасность для отдыхающего (спящего) персонала [34].

Таким образом, известные способы тушения с применением специализированные АЦ и АУП ограниченно применимы для ликвидации пожаров в арктических модулях.

Таблица 1 – Недостатки АУП применительно к арктическим модулям

Водяные и пенные	Аэрозольные	Порошковые	Газовые
– нельзя тушить электрооборудование; – вытеснительная подача (баллоны, насос); – нужен обогреваемый объём для запаса ОТВ	– одноразовые; – значительный разогрев генератора аэрозоля; – риск ложных срабатываний;	– не тушат тлеющие вещества и горящие без доступа O_2; – порошок может не попасть к очагу при сложной конфигурации помещения; – порошок портит металлы;	– хранение газов в баллонах под давлением в помещении;
	– требуется уборка помещения после срабатывания;		
	– опасность для персонала		

Примечание: АУП требуют регулярного и квалифицированного обслуживания, что сложно в условиях АЗ и КС [34]

Результаты и их обсуждение. В ходе проведенных исследований разработан, научно обоснован [14-17, 26-28] и запатентован [29-31] инновационный метод тушения пожаров в модульных объектах в условиях экстремально низких температур. Особенность метода заключается в том, что его эффективность возрастает с понижением температуры окружающей среды. Суть метода заключается в [33] продувке горящего объема модуля наружным холодным воздухом с помощью специально разработанного устройства. Конструкция устройства проста и функциональна: в торцевых частях модуля размещены люки, которые в обычном состоянии закрыты, а в одном из торцов установлен регулируемый вентилятор. При возникновении пожара люки открываются, и вентилятор активируется [24, 36], обеспечивая интенсивную циркуляцию низкотемпературного воздуха через внутреннее пространство модуля, что позволяет эффективно подавлять возгорание (рис. 3).

Предложенный метод обеспечивает комплексный эффект. Во-первых, за счет продувки низкотемпературным воздухом существенно снижается средняя температура внутри модуля, что замедляет и прекращает процесс горения, а также приводит к срыву пламени [14, 15] (рис. 3*в, г*). Во-вторых, продукты сгорания эффективно выводятся через противоположный люк, очищая внутреннее пространство.

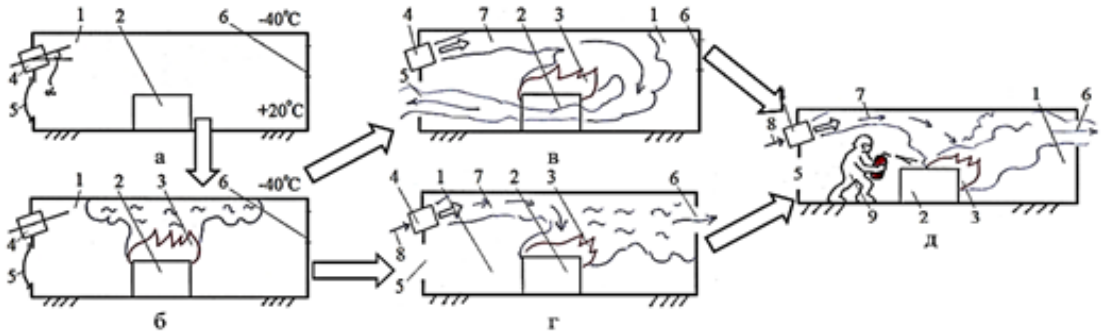


Рисунок 3 – Этапы тушения пожара в арктическом модуле посредством продувки наружным низкотемпературным воздухом с дозированной подачей снега/воды:
а – исходное состояние модуля; б – начало горения пожарной нагрузки;
в – включение продувки наружным воздухом с выпуском продуктов горения через люк 5;
г – продувка наружным воздухом с подачей снега на вход вентилятора и выпуском продуктов горения через люк 6;
д – ликвидация открытого горения и проведение АСР пожарными внутри модуля под защитой воздушной струи (1 – модуль; 2 – пожарная нагрузка; 3 – продукты горения; 4 – вентилятор; 5, 6 – нормально закрытые люки; 7 – воздушная струя; 8 – подача снега/воды; 9 – пожарный; α – угол управляемого отклонения оси вентилятора [33, 34]) [14]

Это создает условия для безопасного проникновения пожарного расчета в модуль. В-третьих, прибывшие специалисты могут, даже без использования защитного снаряжения, оперативно ликвидировать оставшиеся очаги возгорания и провести необходимые аварийно-спасательные работы (АСР) (рис. 3*д*), что фактически является новой тактикой тушения в условиях Арктики [33]. В-третьих, процесс тушения «щадящий» – электрооборудование и приборы в модуле не повреждаются подаваемым воздухом, модуль можно быстро восстановить.

Эффект тушения ещё больше усиливается, если на вход вентилятора персоналом снаружи будет дозированно подаваться снег (рис. 3*в,г,д*) [16]. Кроме того, экспериментально установлен новый тактический приём [14, 17]: пожарные могут действовать в горящем модуле под защитой низкотемпературной воздушной струи, даже не используя средства защиты органов дыхания и зрения (изолирующие противогазы).

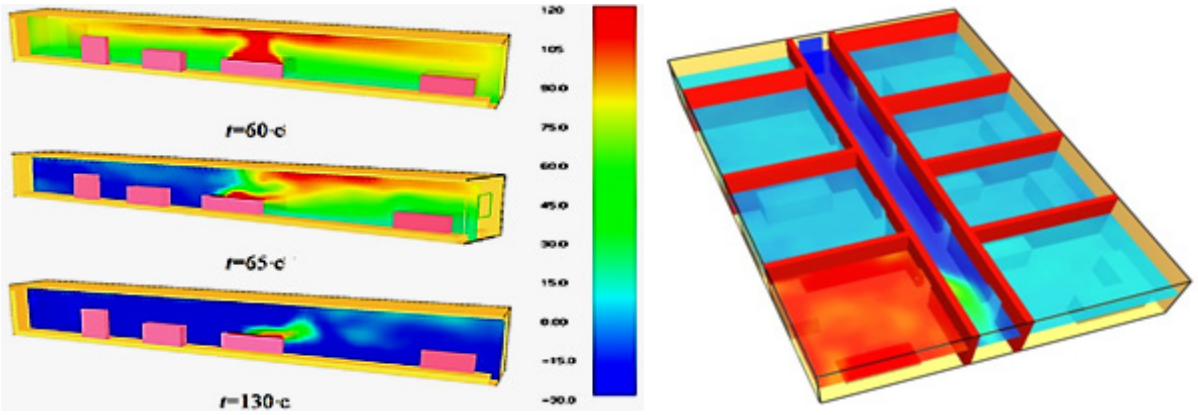
Применительно к объекту в целом может быть создана общая система управления пожарной безопасностью модульных арктических объектов на изложенном принципе. Техническая реализация вышеописанного способа подавления пожара и системы управления пожарной безопасностью не сложнее, чем АУП, а объём наружного низкотемпературного воздуха неограничен. Стоимость также невысока – это расходы на вентилятор с приводом, устройства вскрытия торцевых люков и систему сигнализации. Системой продувки могут оперативно дооборудоваться действующие модули арктических объектов.

Вышеописанный способ подавления пожара может применяться не только для модулей типа (рис. 1*в*), но и для удаления продуктов горения из коридоров более сложных модулей (рис. 1*г*), а также из кают и внутренних палуб кораблей.

Эффективность способа [14-17] обоснована теоретически диаграммой Н. Семёнова [26] и законом С. Аррениуса [27], а также подтверждена компьютерным экспериментом (рис. 4, 5) с использованием полевой модели пожара [28] и применением тактической вентиляции. Был также проведен демонстрационный эксперимент [14], подтвердивший эффект подавления горения продувкой модуля низкотемпературным воздухом с дозированной подачей снега.

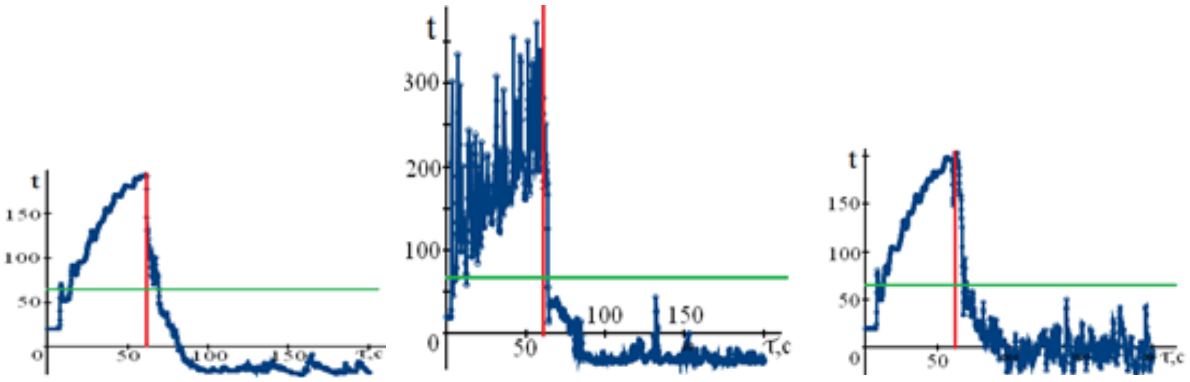
Эффективность известных [24, 25] и предлагаемого [14-17] способов тушения пожаров в арктических модулях можно сравнить с использованием функции ущерба $U(t)$ [34], [18]. На рисунке 6 приведена такая функция, где в динамике показаны действий пожарных в соответствии с БУПО и порядок применения способа [14-17]. Как видно из качественной номограммы $U(t)$ (рис. 6), уменьшение времени, необходимого для начала тушения пожара ($\Delta t_н$), способствует сокращению периода ликвидации открытого горения ($\Delta t_л$), что, в свою очередь, приводит к снижению ущерба (ΔU), наносимого пожаром арктическому модулю.

Если при этом учесть разницу в стоимости АЦ арктического исполнения, депо и содержания экипажа по сравнению со стоимостью системы подавления пожара [14-17] посредством продувки наружным низкотемпературным воздухом с дозированной подачей снега, эффективность способа становится очевидной. Использование продувки модуля наружным низкотемпературным воздухом с контролируемой подачей снега демонстрирует высокую эффективность. Этот метод не противоречит применению АУП и стандартных тактик тушения, предусмотренных БУПО. Кроме того, он обеспечивает повышенную безопасность для пожарных, работающих внутри модуля, за счет защитного действия потока холодного воздуха [34, 35].



а) *б)*

Рисунок 4 – Результаты компьютерного моделирования подавления пожара продувкой наружным воздухом при -400С, VВ=10 м/с:
а – модуль (рис. 1в);
б – продувка коридора палубы корабля или модуля (рис. 1г)
при пожаре в левом крайнем помещении (каюте) на момент t=100 с [14]



а) *б)* *в)*

Рисунок 5 – Динамика температуры в модуле (рис. 1в) при продувке наружным воздухом с температурой минус 400С и скоростью $V_в$=10 м/с [34]: а – левая часть модуля, б – средняя часть, в – правая часть (здесь: t – температура у потолка, 0С; τ – время, отсчитываемое от начала пожара, с; зелёная линия – болевой порог) [14]

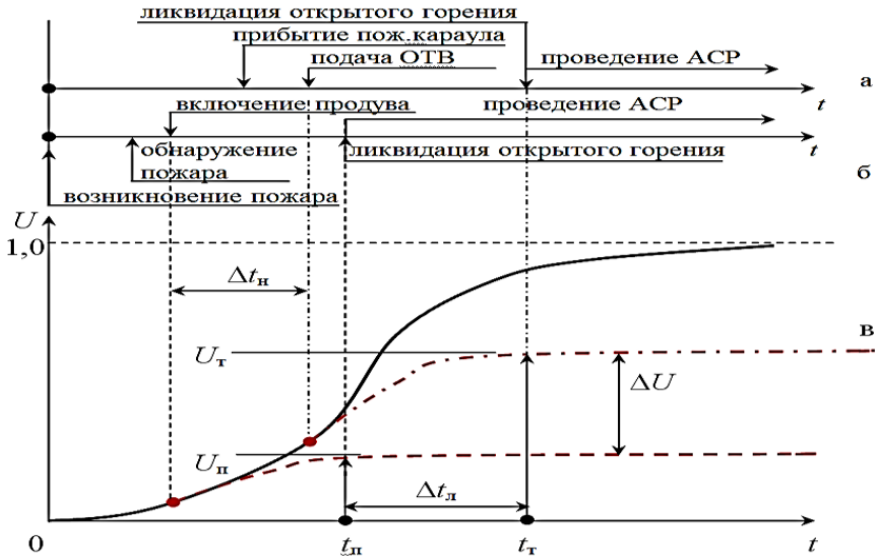


Рисунок 6 – Сравнительный эффект ΔU тушения пожара в арктическом модуле способом продува наружным низкотемпературным воздухом [14-17] (пунктирная линия) и подачей стволов от специализированной АЦ (штрихпунктирная линия);
а – действия пожарных, б – работа системы продува, в – функция ущерба [18, 34] – сплошная линия)

Выводы. Таким образом, впервые показано, что эффективным инновационным способом обеспечения пожарной безопасности модулей арктических объектов является подавление пожара посредством продувки горящего объёма наружным низкотемпературным воздухом с дозированной подачей снега [14-17]. При этом также обеспечивается безопасная работа пожарных внутри модуля под защитой низкотемпературной воздушной струи [33].

Способ прост конструктивно, требует минимальной доработки существующих модулей, безопасен для персонала и пожарных, не приводит к повреждению оборудования в модуле и экономически выгоден по сравнению с известными и запатентован [29-31]. Внедрение данного способа на арктических объектах после соответствующей натурной апробации позволит как повысить их функциональную устойчивость, так обеспечить безопасность персонала и минимизировать риск экологических инцидентов в Арктике [19].

В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть возможность применения вышеописанного способа к арктическим объектам в виде монолитных сооружений с помещениями различных классов функциональной пожарной опасности, а также к судам, осуществляющих плавание по СМП и в высоких широтах. В перспективе могут быть рассмотрены вопросы обоснования численности пожарного и аварийно-восстановительного подразделения, а также обоснование применения аэромобильной установки [32] для оперативного восстановления работоспособности арктического объекта после пожара иди аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Постановление Президиума ЦИК СССР от 15.04.1926 «Об объявлении территорий Союза ССР земель и островов, расположенных в Северном Ледовитом Океане».
2. Закон РФ «О государственной границе Российской

Федерации» от 01.04.1993 г. №4730-1 (с изменениями).

3. Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 220 О внесении изменений в Указ Президента Российской Федерации от 2 мая 2014 г. № 296 О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации.

4. Основы государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 года. – Утверждены Президентом РФ 05.03.2020, № 164.

5. Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации».

6. Государственная программа «Социально-экономическое развитие Арктической зоны РФ», утв. постановлением Правительства РФ от 30.03.2021 г. № 484.

7. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года" (с изменениями и дополнениями).

8. Распоряжение Правительства РФ от 15 апреля 2021 г. № 996-р Об утверждении единого плана мероприятий по реализации Основ государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 года и Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года.

9. Федеральный закон от 17.12. 1998 г. № 191-ФЗ "Об исключительной экономической зоне Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями).

10. «Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года», утв. распоряжением Правительства РФ от 27.11.2021 г. № 3363-р.

11. Постановление Правительства РФ от 18 сентября 2020 г. № 1487 "Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути" (с изменениями и дополнениями).

12. Поправка к статье 67 Конституции РФ о нерушимости границ и о приравнивании отчуждения территорий РФ к экстремизму, 2020 г.

13. Таранцев А.А., Лосев М.А., Таранцев А.А. История и перспективы освоения Арктической зоны и Крайнего Севера. СПб.: ИПТ РАН, 2020. – 48 с.

14. Таранцев А.А., Лосев М.А., Таранцев А.А. Арктика. Пожары. Транспорт: Монография. – СПб.: ИПТ РАН, СПбУ ГПС МЧС России, 2021. – 165 с.

15. Таранцев А.А., Ищенко, А.Д., А.А.Таранцев, Горохов А.П. О способе подавления пожара на объектах Северного Морского пути, в том числе на энергообъектах // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4 (42), Т.4. – С. 202-207.

16. Ищенко А.Д., Таранцев А.А., Шидловский А.Л. Об особенностях действий по тушению пожара в условиях Арктики // Проблемы управления рисками в техносфере. –2020. – №3. – С. 16-20.

17. Таранцев А.А., Ищенко А.Д., Таранцев А.А. Об обосновании инновационного способа тушения пожара на объектах инфраструктуры в услвбиях низких температур // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. - №1 (51), Т.1. – С. 84-89.

18. Таранцев А.А., Ищенко А.Д., Крымский В.В. О построении функции ущерба // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2020. – №4 (56). – С. 54-59.

19. Макоско А.А., Королёва Л.А., Малыгин И.Г., Таранцев А.А., Зайкин Р.Г. Обоснование метода нормирования уровня нефтяного загрязнения почв на территории объектов добычи и транспортировки нефти в Арктической зоне // Арктика, экология и экономика. – 2024. – № 4 (14). – С. 585-595. – DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-585-595.

20. Федеральный закон от 22.07.2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» ФЗ-123 (с изменениями).

21. Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 “Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности”.

22. СП 485.13130.2020 СППЗ. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

23. Методические рекомендации руководителю тушения пожара по организации и проведению тактической вентиляции зданий и сооружений при тушении пожаров и ликвидации последствий ЧС на территории города Москвы. М.: ГУ МЧС России по г. Москве, 2014, 78 с.

24. Теребнёв В.В., Подгрушный А.В. Пожарная тактика: Основы тушения пожаров: учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 322 с.

25. Боевой устав подразделений пожарной охраны, определяющий порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ (Приказ МЧС России от 16.10.2017 г. № 444).

26. Андросов А.С., Бегишев И.Р., Салеев Е.П. Теория горения и взрыва. Учебное пособие. – М.: АГПС МЧС России, 2007. – 240 с.

27. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. М.: Мир, 2000. – 176 с.

28. Контарь Н.А. Карькин И.Н. PyroSim-16. Примеры построения расчётных моделей для решения задач пожарной безопасности зданий и сооружений / Екатеринбург: 2016. – 173 с.

29. Способ тушения пожара в помещении в условиях низких температур и устройство для его реализации / А.А. Таранцев, А.А. Таранцев // Патент РФ №2714272, 2018 г.

30. Способ повышения эффективности тушения пожара в модуле / А.Д. Ищенко, А.А. Таранцев, А.А. Таранцев // Патент РФ №2747410, 2020 г.

31. Способ сдерживания и тушения пожара в арктическом модуле и устройство для его осуществления / Л.Т. Танклевский, А.А. Таранцев, А.Д. Ищенко, А.А. Таранцев // Патент РФ № 2789791, 2022 г.

32. Способ энергообеспечения и монтажа объектов в экстремальных условиях и аэромобильная установка для его осуществления / А.А. Таранцев, В.И. Чугунов // Патент РФ № 2748809, 2021 г.

33. Таранцев А.А. О тактике тушения модульных объектов // Вестник СПбУ ГПС МЧС России, №4, 2021 г. – С. 195-201.

34. Таранцев А.А. Способы и средства сдерживания и тушения пожаров на удаленных объектах при экстремально низких температурах: дис. ... канд. техни. наук. – М., 2022. – 155 с.

35. Таранцев А.А. Перспективный способ сдерживания и тушения пожара в арктическом модуле // Сборник трудов конференции «Безопасная Арктика – 2023». 06-07.2023, ВНИИ ГО ЧС, С. 206-214.

36. Таранцев А.А., Ищенко А.Д., Таранцев А.А. О живучести объектов инфраструктуры в Арктике при пожарах // Интеллектуальные технологии на транспорте. №3, 2021 г., С. 46-51.

37. Таранцев А.А., Ищенко А.Д., Таранцев А.А. Оценка эффективности инновационного способа тушения пожара в арктическом модуле // Сборник трудов конференции «Сервис безопасности в России: Опыт, проблемы, перспективы». 20.10.2020, СПбУ ГПС МЧС России, С. 19-23.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.84
EDN: VLDVNQ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВИДЕОКАМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕРРИТОРИИ ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

©Автор(ы) 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)

ДЕМИНА Александра Денисовна, студент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: aleksandra.demina.03@mail.ru)

Аннотация. Проблема эффективного мониторинга лесных пожаров остается открытой. Актуальность исследования обусловлена увеличением частоты и интенсивности лесных пожаров, что требует разработки новых подходов к их раннему обнаружению и предупреждению. Экономически целесообразны и наиболее реализуемы для мониторинга лесных массивов и сельской местности остаются системы раннего обнаружения пожаров, основанные на применении видеокамер с круговым обзором. В ходе исследования рассмотрены различные варианты расстановки видеокамер с круговым обзором на равнинном рельефе местности с целью нахождения наиболее рационального способа их расположения, который минимизирует финансовые затраты, не допустит появления «слепых» зон и значительно повысит вероятность раннего обнаружения возгораний. Для этого было получено аналитическое выражение, позволяющее определить наиболее рациональный способ размещения видеокамер. В результате была получена схема рационального расположения видеокамер на контролируемой территории. Основываясь на данной схеме, возможна разработка математической модели для расчета количества видеокамер в зависимости от размеров площади территории, которую нужно контролировать от возможного возникновения пожара.

Ключевые слова: лесные пожары, системы раннего обнаружения лесных пожаров, мониторинг, площадь контролируемой территории, количество видеокамер, рациональный способ расположения видеокамер, «слепые» зоны.

DETERMINATION OF CAMERA PLACEMENT SCHEME FOR PROTECTING TERRITORY FROM FOREST FIRES

© Authors 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)

DEMINA Aleksandra Denisovna, student of the Department of Life Safety
South Ural State University (National Research University)
(76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia, e-mail: aleksandra.demina.03@mail.ru)

Abstract. The problem of effective monitoring of forest fires remains open. The relevance of the study is due to an increase in the frequency and intensity of forest fires, which requires the development of new approaches to their early detection and prevention. Early fire detection systems based on the use of video cameras with an all-round view remain economically feasible and most feasible for monitoring forests and rural areas. In the course of the study, various options for arranging video cameras with an all-round view on a flat terrain were considered in order to find the most rational way to position them, which minimizes financial costs, prevents the appearance of "blind spots" and significantly increases the likelihood of early detection of fires. For this purpose, an analytical expression was obtained that allows us to determine the most rational way to place video cameras. As a result, a scheme for the rational location of video cameras in a controlled area was obtained. Based on this scheme, it is possible to develop a mathematical model for calculating the number of video cameras, depending on the size of the area of the territory that needs to be controlled from a possible fire.

Keywords: forest fires, early detection systems for forest fires, monitoring, the area of the controlled territory, the number of video cameras, the rational way to position video cameras, "blind" zones.

Для цитирования: *Богданов А.В. Определение схемы расположения видеокамер для контроля территории от лесных пожаров / А.В. Богданов, А.Д. Демина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 183-187. – EDN: VLDVNQ.*

Введение. Лесные пожары представляют собой одну из наиболее серьезных экологических угроз, способных нанести значительный ущерб как природным экосистемам, так и человеческому обществу [1-9]. Частота и интенсивность лесных пожаров в последние десятилетия остаются значительными. Это в полной мере относится и к сельской местности [10-17]. Как видно из диаграммы (рис. 1), построенной согласно данным Рослесхоза [18] за 2022, 2023, 2023 годы, площадь лесных пожаров возрастает. В 2024 году она составила 5099240 гектар.

Поэтому необходимость в эффективных системах контроля и раннего обнаружения пожаров становится особенно актуальной.

Современные технологии предоставляют новые возможности для мониторинга лесных массивов, включая использование спутниковых данных, беспилотных летательных аппаратов (дронов) и сенсорных сетей. При этом мониторинг лесных массивов с помощью спутников требует больших финансовых вложений, а использование беспилотных летательных аппаратов в настоящее время может быть затруднено, так как требует специальных разрешений. Поэтому экономически целесообразны и наиболее реализуемы для мониторинга лесных массивов и сельской местности являются системы раннего обнаружения пожаров, основанные на применении видеокамер с обзором 360˚.

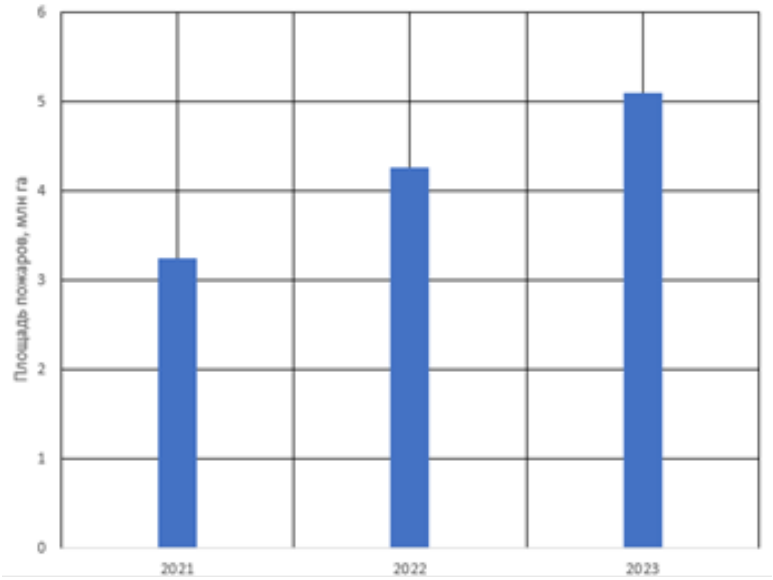


Рисунок 1 – Изменение площади лесных пожаров по годам

На практике обычно известна площадь, которую требуется мониторить. Для этой площади необходимо определить количество видеокамер. В научных трудах [19, 20] была предпринята попытка связать контролируемую видеокамерами площадь с их количеством. Для этого была получена математическая модель [20] для прямоугольных ровных поверхностей на местности:

$$\begin{cases} S_{\text{территории}} = \pi r^2 \cdot N \cdot M - (2 \cdot N \cdot M - N - M) \cdot r^2 \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \\ O_1O_2 = \sqrt{2} \cdot r \end{cases} \quad (1)$$

где $S_{территории}$ – площадь территории, на которой осуществляется мониторинг, м^2; N – количество внешних видеокамер по горизонтали (длине) прямоугольной площади; M – количество внешних видеокамер по вертикали (ширине) прямоугольной площади; r – радиус зоны наблюдения или дальность наблюдения каждой видеокамеры, м; O_1O_2 – расстояние между соседними видеокамерами, м.

Недостатком данной математической модели является то, что она позволяет определять площадь $S_{территории}$ в зависимости от количества видеокамер, а не наоборот (в реальных условиях требуется определять количество камер в зависимости от площади контролируемой территории). При этом, из нее нельзя выразить количество видеокамер, зная площадь $S_{территории}$. Это связано с тем, что в верхнем уравнении системы (1) имеются две неизвестные переменные N и M. Поэтому требуется разработка новых математических моделей, позволяющих рассчитывать количество видеокамер в зависимости от площади контролируемой территории и основанных на анализе различных вариантов расположения видеокамер.

Методология. Целью работы является определение наиболее рациональной расстановки видеокамер на контролируемой площади. При этом, количество видеокамер с экономической точки зрения должно быть минимальным, но исключающим «слепые» зоны. А дополнительные контролируемые зоны за пределами интересующей нас территории сведены к наименьшему значению. Запишем эти условия в виде математического выражения:

$$\begin{cases} K \to min \\ S_{\text{доп}} \to min \\ S_{\text{сз}} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где K – количество видеокамер; $S_{доп}$ – дополнительные зоны, отслеживаемые видеокамерами

за пределами контролируемой площади, м^2; $S_{сз}$ – площадь слепых зон (площадь, которая не отслеживается видеокамерами в пределах контролируемой площади), м^2.

На практике территория, которая должна контролироваться с целью обнаружения пожаров, может иметь различную конфигурацию, что затрудняет расчет количества видеокамер. Поэтому сделаем ряд допущений. Примем, что контролируемая площадь имеет форму прямоугольника и ровную поверхность. Тогда количество видеокамер К можно рассчитать известным способом:

$$K = N \cdot M. \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в систему (2), получим следующее условие:

$$\begin{cases} N \cdot M \rightarrow min \\ S_{доп} \rightarrow min \\ S_{сз} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Полученное условие (4) может стать основой для разработки математической модели определения количества видеокамер, зная площадь контролируемой территории.

Результаты. Для определения рациональной расстановки видеокамер, удовлетворяющей условию (4), рассмотрим несколько схем, иллюстрирующих расположение видеокамер.

На рисунке 2 представлен пример расположения видеокамер с радиусом видимости *r* сеткой 4 на 3 (4 видеокамеры по горизонтали и 3 видеокамеры по вертикали), полностью находящиеся внутри границ контролируемой площади. Контролируемая площадь на рисунке 2 представлена прямоугольником.

При таком расположении (рис. 2) внутренняя часть площади не имеет «слепых» зон, зато по периметру контролируемой территории такие зоны появляются (выделены штриховкой). Это недопустимо, так как площадь контролируется не полностью, а пожар может возникнуть вне зоны видимости (в «слепых» зонах).

Избавиться от «слепых» зон можно, расположив наружные видеокамеры по внешней границе контролируемой площади непосредственно по её периметру (рис. 3).

При таком расположении (рис. 3) отсутствуют «слепые» зоны. Однако такой способ не самый выгодный с экономической точки зрения, так как отслеживается значительная дополнительная территория (показана штриховкой) за пределами границ контролируемой площади, что требует большего количества видеокамер.

Снизить количество видеокамер без образования слепых зон на контролируемой территории можно, используя схему, представленную на рисунке 4.

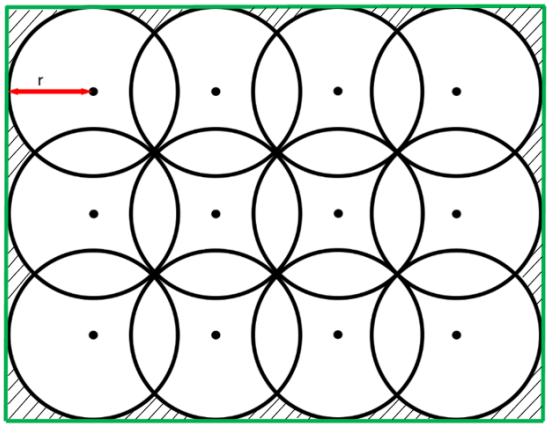


Рисунок 2 – Пример расположения видеокамер сеткой 4 на 3 внутри границ контролируемой площади (N=4, M=3)

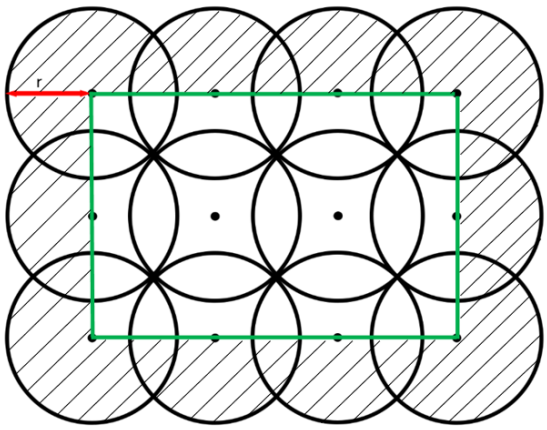


Рисунок 3 – Пример расположения видеокамер сеткой 4 на 3 (N=4, M=3) с расстановкой наружных видеокамер по периметру контролируемой площади

Данный способ расположения (рис. 4) является наиболее рациональным, так как позволяет исключить слепые зоны за счет более эффективного использования видеокамер. Дополнительно контролируется лишь небольшая территория (показана штриховкой), выходящая за границы контролируемого участка.

Поэтому наиболее приемлемым расположением видеокамер является схема, представленная на рисунке 4. Она более полно удовлетворяет предложенному условию (4).

Для выполнения условия (4) необходимо найти количество видеокамер *K* или их количество по горизонтали *N* и вертикали *M*. Так как площадь территории, на которой осуществляется мониторинг, может иметь любые размеры, то можно представить схему расположения видеокамер в общем виде (рис. 5) на основе схемы, представленной на рисунке 4.

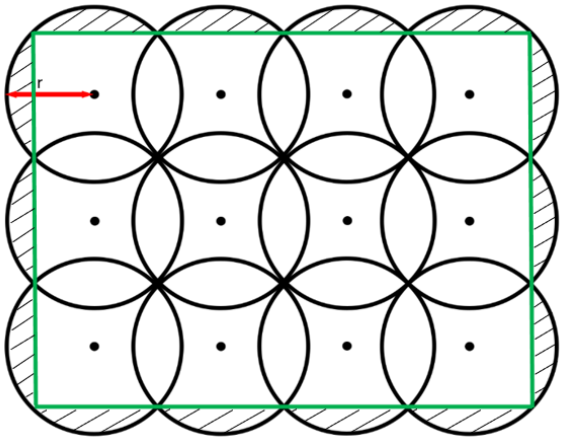


Рисунок 4 – Пример расположения контролируемой площади в пределах зон видимости видеокамер с сеткой 4 на 3 (N=4, M=3)

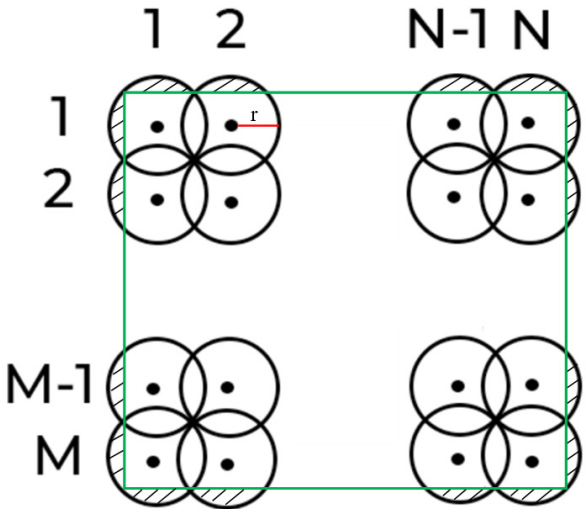


Рисунок 5 – Схема рационального расположения видеокамер на контролируемой территории (в общем виде)

Обсуждение. Полученное условие (4) и схема рационального расположения видеокамер (рис. 5) являются основой для разработки математической модели для определения рационального количества видеокамер в зависимости от радиуса видимости видеокамер *r* и размеров контролируемой площади, на которой может возникнуть пожар.

Выводы. В данной работе были рассмотрены различные способы размещения видеокамер для контроля определенной площади территории. Выбран наиболее рациональный вариант их расстановки исходя из полученного выражения (4). В настоящее время, основываясь на рациональном варианте, на кафедре безопасности жизнедеятельности ЮУрГУ разрабатывается математическая модель для расчета количества видеокамер в зависимости от размеров площади территории, которую нужно контролировать от возможного возникновения пожара. Расчет рационального количества видеокамер позволит снизить без ущерба качеству затраты на системы обнаружения лесных пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. 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. – Текст: электронный // Лань:

электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/180025 (дата обращения: 12.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Проблемы устойчивости развития социально-экономических систем: материалы Международной научно-практической конференции. 24 ноября 2022 г: материалы конференции / ответственные редакторы А.А. Бурмистрова [и др.]. – Тамбов: ТГУ им. Г.Р.Державина, 2022. – 712 с. – ISBN 978-5-00078-682-6. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/331259 (дата обращения: 12.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

3. Амельчугов, С.П. Горение древесины при пожаре: учебно-методическое пособие / С.П. Амельчугов, Р.Г. Шубкин. – Железногорск: СПСА, 2021. – 82 с. – Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/170685 (дата обращения: 12.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

4. Смирнов, А.П. Охрана и защита лесов. Лесные пожары: учебное пособие для спо / А.П. Смирнов, А.А. Смирнов. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 124 с. – ISBN 978-5-507-44170-9. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/215765 (дата обращения: 12.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

5. Смирнов, А.П. Введение в лесную пирологию / А.П. Смирнов, А.А. Смирнов. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 84 с. – ISBN 978-5-507-45981-0. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/319346 (дата обращения: 09.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

6. Смирнов, А.П. Лесная пирология: учебное пособие / А.П. Смирнов; под редакцией Е.Н. Кузнецова. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2021. – 136 с. – ISBN 978-5-9239-1227-2. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/book/179188 (дата обращения: 12.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

7. Иванов, В.А. Лесное пожароуправление: практикум: учебное пособие / В.А. Иванов, Л.В. Буряк, С.А. Москальченко. – Красноярск: СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2022. – 92 с.

8. Еналеева-Бандура, И.М. Модели и методы эколого-экономической оценки продуктивности лесных территорий с учетом уровня развития транспортной сети: монография / И.М. Еналеева-Бандура, Р.Н. Ковалев, А.Н. Баранов, Н.Н. Шишоркин. – Красноярск: СибГУ им. академика М.Ф. Решетнёва, 2022. – 162 с.

9. Сомова, Ю.В. Охрана труда. Прогнозирование опасных и вредных производственных факторов: учебное пособие / Ю.В. Сомова, Т.В. Свиридова. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2023. – 114 с.

10. Антонов, А.В. Краткий курс лекций по дисциплине “Производственная и пожарная автоматика”: учебное пособие / А.В. Антонов, Е.И. Голякова, И.В. Сацук, А.П. Филкова. – Железногорск: СПСА, 2023. – 296 с.

11. Петров, В.Н. Современные методы мониторинга лесных пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов / В.Н. Петров, А.В. Иванов // Вестник лесного хозяйства. – 2021. – № 3. – С. 45-51.

12. Кочуров, Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие лесных территорий / Б.И. Кочуров, А.В. Смирнов. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 144 с.

13. Гришин, А.М. Моделирование распространения лесных пожаров с применением ГИС-технологий / А.М. Гришин, В.А. Соколов // Современные проблемы науки и образования. – 2022. – № 2. – С. 123-130.

14. Елагин, В.Г. Дистанционное зондирование и мониторинг лесных экосистем: учебное пособие / В.Г. Елагин, Д.А. Романов. – Москва: Лань, 2021. – 156 с.

15. Залесов, С.В. Оценка эффективности систем раннего обнаружения лесных пожаров / С.В. Залесов, Е.А. Иванова, А.А. Смирнов // Леса России и хозяйство в них. – 2020. – № 2 (65). – С. 67-74.

16. Ложкина, О.В. Анализ влияния изменения климата на природные пожары на примере российской федерации и ряда зарубежных стран / О.В. Ложкина, С.В. Орловцев, А.Г. Савинов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2022. – № 4. – С. 111-121. – ISSN 1998-8990. – Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: https://e.lanbook.com/journal/issue/347840 (дата обращения: 12.02.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

17. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: официальный сайт. – 2024. – URL: https://mchs.gov.ru/ (дата обращения: 12.02.2025). – Текст : электронный.

18. Федеральное агентство лесного хозяйства: официальный сайт – 2024. – URL: https://rosleshoz.gov.ru (дата обращения: 12.02.2025). – Текст : электронный.

19. Богданов, А.В. Определение площади, контролируемой видеокамерами системы раннего обнаружения пожара // А.В. Богданов, Г.А. Полунин, Ю.С. Козлова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2022. – № 4 (27). – С. 20-25. – http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2022/v4/N27_20-25.pdf (дата обращения: 12.02.2024). doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.38.87.006.

20. Сулейманов, И.Э. Определение контролируемой площади системой раннего обнаружения пожаров: специальность 20.04.01 «Техносферная безопасность»: магистерская диссертация / Сулейманов И.Э.; Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). – Челябинск, 2024. – 61 с. – https://dspace.susu.ru/xmlui/handle/00001.74/59049 (дата обращения: 25.07.2025).

Статья поступила в редакцию 14.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 628.517.2
EDN: WNHSNJ

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ГЛУШИТЕЛЯ ШУМА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 4241-1622
AuthorID: 848376
ORCID: 0000-0001-7891-1291

ДЕМЕНТЬЕВА Юлия Васильевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Приволжский государственный университет путей сообщения
(443066, Россия, г. Самара, ул. Свобода, 2В, yulia_dementyeva@bk.ru)

SPIN: 2665-5932
AuthorID: 409833
ORCID: 0000-0002-7560-3039
ResearcherID: AAQ-3086-2021
ScopusID: 57215095746

ПЛИЦЫНА Ольга Витальевна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Управление безопасностью в техносфере»
Российский университет транспорта
(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, e-mail: plitsa@yandex.ru)

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы рациональной компоновки глушителей шума вентиляционных систем. В системах с большими воздуховодами применимы отражательные щелевые глушители, каналы которых образованы прессованными переменными профилями. Целью работы является повышение акустической эффективности щелевых каналов за счет выбора геометрии переменных профилей в глушителе. Математическая модель глушителя реализована методом эквивалентных многомерных цепей четырехполюсников; алгоритмическая модель глушителя реализована методами Simulink. Рассчитаны акустические характеристики щелевых устройств: щелевых каналов с различным порядком расположения расширений; щелевых конструкций с различным количеством каналов, содержащих парные сужения и расширения; щелевых каналов с парными сужениями и расширениями, длина которых изменяется в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.5}$-$2^{-1.1}$. Обоснование рациональной геометрии переменных профилей в щелевом глушителе позволяет уточнить характеристику отражательных устройств. Анализ расположения расширений в щелевом канале показывает преимущество их очередности по убыванию длин. Анализ многощелевых конструкций подтверждает сближение акустических характеристик соседних каналов при их составлении профилями с парами верхней и нижней полок равной длины. Анализ длины парных сужений и расширений в щелевом канале указывает на достижимость требуемого для вентиляционных систем ровного снижения шума. Применение переменных профилей, которые содержат пары верхней и нижней полок равной длины, изменяющейся в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.6}$, обеспечивает акустическую эффективность и технологичность щелевого глушителя.

Ключевые слова: шум, глушитель, вентиляционные системы, переменные профили, щелевые каналы, рациональная геометрия, парность длин, расположение расширений, акустическая эффективность, технологичность.

SUBSTANTIATING THE GEOMETRY OF CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF THE VENTLATION SYSTEMS NOISE REFLECTIVE SILENCER

© The Author(s) 2025

DEMENTIEVA Yulia Vasil'evna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department «Life safety and ecology»
Volga State University of Railway Transport
(RF 443066 Samara, Svoboda st., 2B, yulia_dementyeva@bk.ru)

PLITSYNA Olga Vital'evna, candidate of technical sciences, docent,
associate professor of the department «Safety management in the technosphere»
Russian University of Transport
(127994, Russia, Moscow, Obraztsova st., 9, build. 9*, e-mail: plitsa@yandex.ru)*

Abstract. The paper deals with the issues of composing the silencers for ventilation systems. Reactive slit silencers, which formed by extruded variable profiles, are useable in the systems with large air ducts. The purpose of the work is increasing the acoustic efficiency of slit ducts by means of selecting the geometry of the variable profiles in the silencer. The mathematical model of the silencer is realized by the method of equivalent multidimensional circuits of four-poles; the algorithmic model of the silencer is realized by Simulink methods. The acoustic characteristics of the slit devices were calculated: slit ducts with different placement order of expansions; slit constructions with different number of ducts

containing pairs of narrowings and expansions; slit ducts with pair narrowings and extensions which have the length changing in a geometric progression with ratio $2^{-0.5}$-2-$^{1.1}$. Substantiating the rational geometry of variable profiles in the slit silencer allows clarifying the characteristics of the reflecting devices. The analysis of expansions placement shows the advantage of placement in descending order of length. The analysis of multi-slit constructions confirms the similarity of adjacent ducts acoustic characteristics if the ducts are formed by variable profiles with pairs of upper and lower flanges of equal length. The analysis of the paired narrowings and expansions length in the slit duct indicates reachability of the required even noise reduction for ventilation systems. The usage of the variable profiles, which contain pairs of upper and lower flanges of equal length changed in geometric progression with the ratio $2^{-0.6}$, provides the acoustic efficiency and manufacturability of the slit silencer.

Keywords: noise, silencer, ventilation systems, variable profiles, slit duct, rational geometry, paired lengths, placement of expansions acoustic efficiency, manufacturability.

Для цитирования: *Дементьева Ю.В. Обоснование геометрии конструктивных элементов отражательного глушителя шума вентиляционных систем / Ю.В. Дементьева, О.В. Плицына // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 188-192. – EDN: WNHSNJ.*

Введение. Устойчивое производство предполагает присутствие на объектах систем механической вентиляции с обязательной защитой от аэродинамического шума [1-5]. В вентиляционных системах с магистральными воздуховодами большого поперечного размера применимы отражательные щелевые глушители [4, 5].

Глушитель выполняется дроблением воздуховода (рис. 1*а*), который характеризуется многомодовым составом волн, прессованными переменными профилями. Узость получаемых каналов создает возможность снижения шума однокоординатными отражателями. Переменные профили позволяют формировать настроенные щелевые расширительные камеры (рис. 1*б*).

Переменный профиль, образуя в неодинаковой очередности сужения и расширения соседних каналов (рис. 1*в*), предопределяет расхождения в акустической эффективности каналов и, как следствие, падение акустической эффективности глушителя [6-10].

Оптимизация всей конструкции [11-15] отражательного глушителя в большом канале осложняются разнообразием вариантов конструкции, наличием мод высшего порядка, ограничением потерь давления, требованиями технологичности [16-20]. Поэтому оправдана рациональная компоновка щелевых каналов. Рациональная геометрия переменных профилей, создавая условия для сближения наиболее ровных акустических характеристик соседних каналов, обеспечит повышение акустической эффективности и технологичности щелевого глушителя.

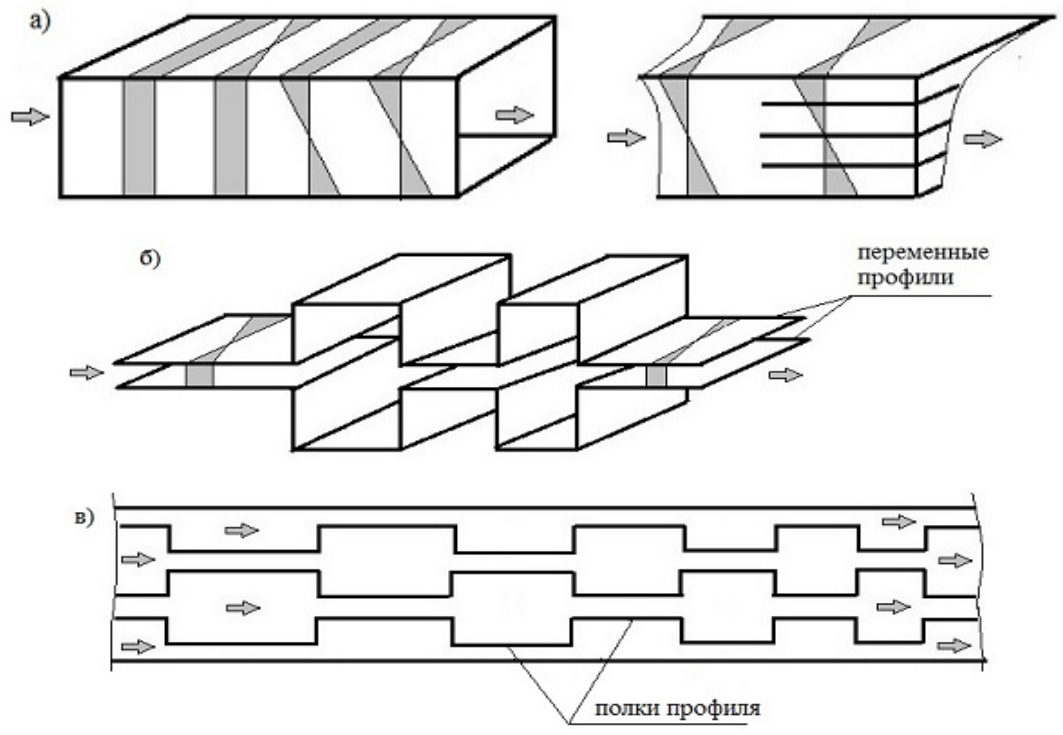


Рисунок 1 – Выполнение щелевого глушителя в магистральном воздуховоде:
а – разделение воздуховода на щелевые каналы; б) компоновка щелевых расширительных камер;
в) формирование различающихся щелевых каналов

Известные результаты расчета и аэродинамических испытаний щелевых глушителей шума отдельных вентиляционных систем [4, 5] позволяют считать длину вертикальных полок переменных профилей фиксированной. Ее величина опосредована нормированной верхней граничной частотой снижаемого шума и стандартными для вентиляционных систем предельными потерями давления.

Однако рациональную длину верхних и нижних горизонтальных полок необходимо уточнить, приняв во внимание предположение [4], что парность сужений и расширений равной длины способствует сокращению различия каналов.

Целью работы является повышение акустической эффективности щелевых каналов за счет выбора геометрии переменных профилей в глушителе.

Задачи работы:

– установление рациональной очередности расширений в щелевых каналах;

– выявление рациональной длины горизонтальных полок переменных профилей, образующих щелевые каналы.

Методология. Математическая модель щелевого глушителя реализована методом эквивалентных многомерных цепей четырехполюсников.

Расчеты акустической эффективности щелевых конструкций проведены с использованием *Simulink*.

Рассчитывались следующие устройства:

– щелевые каналы с изменением порядка расположения в них расширений 0.68 м, 0.34 м, 0.17 м, 0.08 м, пронумерованных цифрами 1, 2, 3, 4; во всех вариантах (1-2-3-4, 2-3-4-1, 3-2-4-1, 3-2-4-1, 2-1-3-4) длины сужений равны среднегеометрическому длин соединяемых расширений (рис. 2*а*);

– многощелевые конструкции с изменением количества каналов двух видов (А, В); во всех вариантах (А-В, А-В-А) каналы образованы профилями, содержащими пары верхней и нижней полок равной длины (рис. 2*б*);

– щелевые каналы с парными сужениями и расширениями, длина которых изменяется в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.5}$-$2^{-1.1}$; во всех вариантах длина первой пары верхней и нижней полок профиля – 0.6 м (рис. 2*в*).

Для переменных профилей в рассмотренных устройствах было принято: ширина – 1.0 м; длина вертикальных полок – 0.06 м.

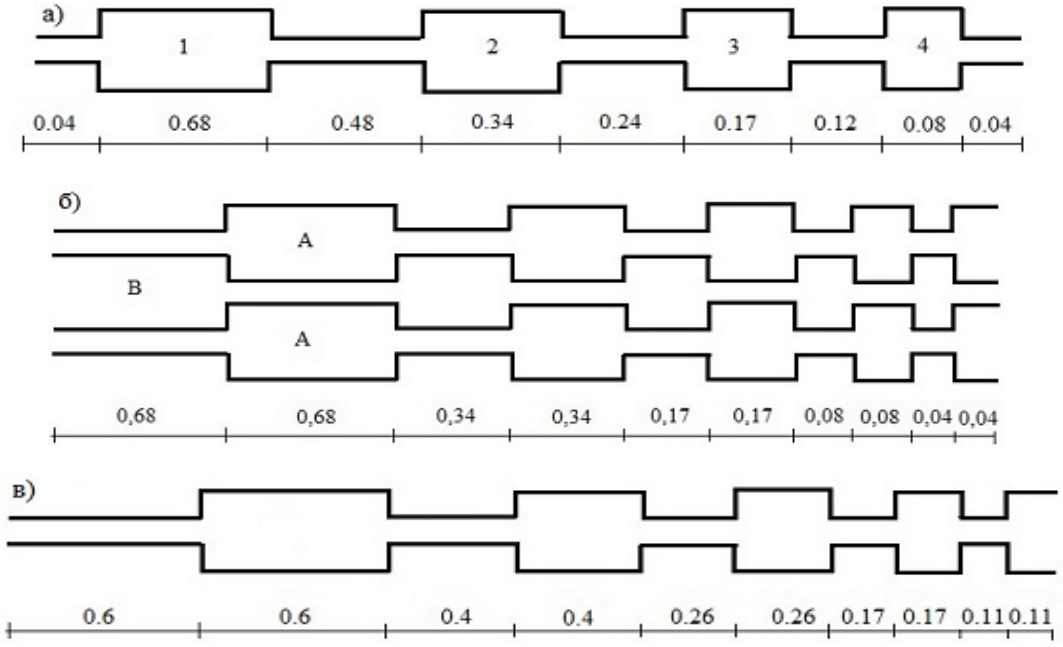


Рисунок 2 – Варианты щелевых устройств:
а – щелевой канал с разными длинами расширений и сужений;
б) многощелевая конструкция со спаренными отрезками одинаковой длины в каналах;
в) щелевой канал со спаренными отрезками одинаковой длины, изменяющимися в прогрессии;
1,2,3,4 – номер расширения в зависимости от его длины; А,В – вид щелевого канала

Результаты. Сопоставление результатов расчета щелевых каналов, имеющих неодинаковую очередность расширений (рис. 3*а*), позволяет отметить, что наиболее ровную акустическую характеристику имеет канал, в котором расширения размещены по порядку снижения их длин.

Схожесть акустической эффективности двух- и трехщелевого устройств (рис. 3*б*) свидетельствует о том, что парность сужений и расширений равной длины способствует существенному сокращению различия каналов.

Схожесть акустической эффективности двух- и трехщелевого устройств (рис. 3*б*) свидетельствует о том, что парность сужений и расширений равной

длины способствует существенному сокращению различия каналов.

Согласно результатам расчета, наиболее ровная акустическая характеристика (рис. 3*в*) – у щелевого канала с длинами парных расширений и сужений, изменяющимися в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.6}$.

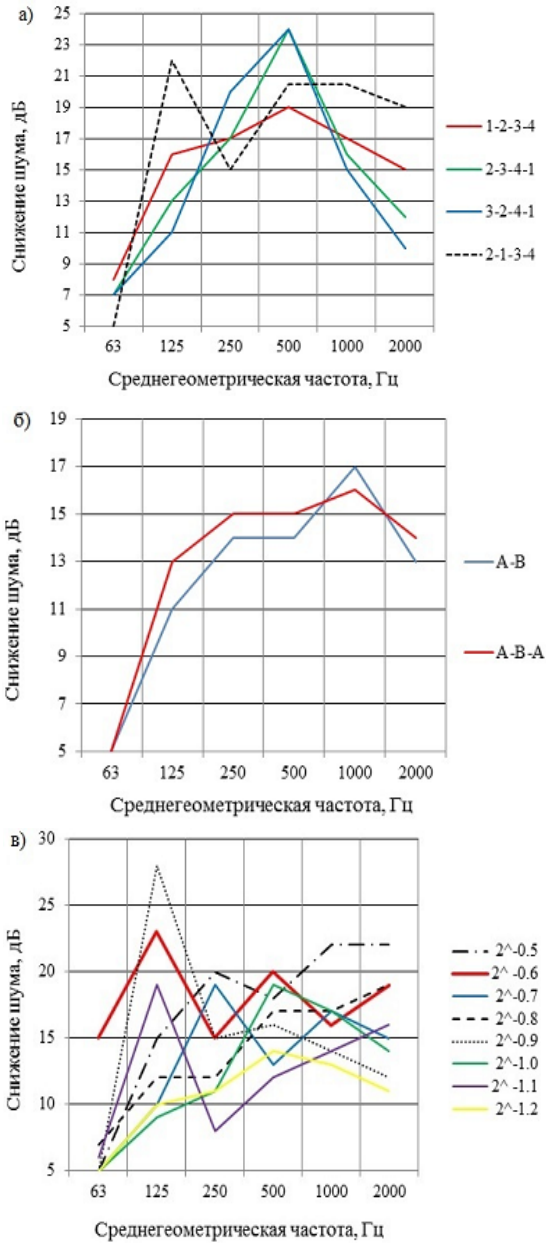


Рисунок 3 – Акустические характеристики щелевых устройств;
а – щелевых каналов с изменяющимся порядком расположения расширений;
б – многощелевые конструкции с изменяющимся количеством каналов вида А и В;
в – щелевые каналы с парными сужениями и расширениями, длина которых изменяется в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.5}$– $2^{-1.1}$

Обсуждение. Представленные результаты получены на основе математической модели, адекватность которой реальным процессам подтверждена экспериментально на аэроакустическом стенде [5].

Выявленные соотношения дополняют характеристику отражательных устройств [6, 10, 17, 18].

Приведенные результаты рассматриваются в продолжение данных о конструктивных особенностях щелевых глушителей [4, 5].

Результаты анализа расположения расширений в щелевом канале демонстрируют преимущество расположения по убыванию длин. Указанная очередность упрощает выполнение переменных профилей для глушителя.

Результаты анализа щелевых конструкций с изменяющимся набором каналов подтверждают сближение акустических характеристик соседних каналов при их составлении профилями с парами верхней и нижней полок равной длины. Отмеченная компоновка создает предпосылки унификации периодических профилей.

Результаты анализа длины парных сужений и расширений в щелевом канале указывают на достижимость требуемого [3, 4] для вентиляционных систем ровного снижения шума. Как следствие, щелевой глушитель рекомендуется комплектовать переменными профилями, которые содержат пары верхней и нижней полок равной длины, изменяющейся в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.6}$.

В итоге полученные результаты свидетельствуют о том, что установлена рациональная геометрия переменных профилей, обеспечивающая акустическую эффективность и технологичность щелевого глушителя.

Выводы. Обоснование рациональной геометрии переменных профилей в глушителе позволяет уточнить описание отражательных устройств в трехмерном пространстве.

Было установлено следующее:

– щелевой канал, в котором расширения размещены по порядку снижения их длин, имеет ровную акустическую характеристику;

– наличие парных сужений и расширений равной длины в канале ведет к существенному сокращению различия соседних каналов многощелевого устройства;

– щелевой канал с длинами парных расширений и сужений, изменяющимися в геометрической прогрессии со знаменателем $2^{-0.6}$, имеет ровную акустическую характеристику.

Практическую значимость полученных результатов составляют рекомендации по выполнению переменных профилей, обеспечивающих акустическую эффективность и технологичность щелевого глушителя шума вентиляционных систем.

Представляется перспективным установление рациональной геометрии конструктивных элементов щелевого глушителя при ограниченной длине магистрального воздуховода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Breuer J.H., Pelz P.F. Algorithmic planning of ventilation systems: Optimising for life-cycle costs and acoustic comfort // Journal of Building Engineering. – 2025. – Vol. 99. – P. 111547.

2. Wu W.-Q., Zhang Y.-B., Chen T.- G. Design and evaluation of an acoustic metamaterial for ducted fan noise control // Applied Acoustics. – 2025. – Vol. 220. – P. 109983.

3. Кобзарь Д.Д., Вельбель А.М., Олейников А.Ю. Особенности акустического расчёта систем вентиляции // Noise Theory and Practice. – 2018. – № 14. – С. 41-45.

4. Плицына О.В., Рогова Т.Н. Характеристики глушителя щелевой конструкции // Вестник НЦБЖД. 2019. – № 4 (42). – С. 159-163.

5. Плицына О.В., Рогова Т.Н. Противопожарная конструкция глушителей // Техносферная безопасность. 2019. – № 3 (24). – С. 73-77.

6. Kashikar A., Suryawanshi R., Savant S. Development of muffler design and its validation // Applied Acoustics. 2021. – Vol. 180. – P. 108132.

7. Elsayed A., Bastien C., Jones S., Christensen J., Medina H., Kassem H. Investigation of baffle configuration effect on the performance of exhaust muffler. Case Studies in Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 10. – P. 86-94.

8. Goto A.M., Monteiro W.V., Dos Santos J.M. Experimental and numerical investigation of defect modes in periodic expansion chamber mufflers// Mechanics Research Communications. – 2025. – Vol. 148. – P. 10445.

9. Y. Zhang, P. Wu, J.Xue, Analysis on acoustic performance and flow field in the split-stream rushing muffler unit. Journal of Sound and Vibration. – 2018. – Vol. 430. – P. 185-195.

10. Матасова О.Ю., Комкин А.И., Быков А.И. Особенности расчета элементов глушителей шума при наличии потока // Noise Theory and Practice. – 2024. – № 10 (1). – С. 18-28.

11. Jaeho C., Jin W.L. Ultra-wideband acoustic meta-silencer to achieve target overall noise reduction levels: Design and experimental validation // Applied Acoustics. – 2025. – Vol. 239. – P. 110852.

12. Xiaomeng J., Hongbin F., Li C. Topology optimization of sub-chambers in a reconfigurable modular origami silencer for tunable and broadband sound attenuation // Applied Acoustics. – 2025. – Vol. 239. – P. 110868.

13. Fonseca de Lima K., Dea Cirino Ph., Barbi N. Multi-frequency sequential and simultaneous parametric shape optimization of reactive silencers // Applied Acoustics. 2020. – Vol. 171. – 10754.

14. Jaeho C., Jin W.L., Jaeho C. Generative sequential design framework for ultra-wideband acoustic meta-silencers // International Journal of Mechanical Sciences. – 2025. – Vol. 294. – P. 110243.

15. Byung H.A., Jin W.L. Deep-learning-based generative design for optimal reactive silencers// International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Vol. 284. – P. 109736.

16. Hakan A., Kirby R., Malecki C. Theoretical and experimental investigation of acoustic performance of multi-chamber reactive silencers. Applied Acoustics. – 2019. – Vol. 157. – P. 106987.

17. Васильев А.В., Иванов Н.И., Шашурин А.Е. Разработка и апробация глушителей шума энергетических установок // Экология и промышленность России. – 2023. – № 27 (2). – С. 10-14.

18. Kyeom J.L., Seung K.O., Woo J.L. Methods for evaluating in-duct noise attenuation performance in a muffler design problem. Journal of Sound and Vibration. – 2019. – Vol. 464. – P. 114982.

19. Shashurin A.E., Ivanov N.I., Vasilvev A.V., Elkin Y.I., Razakov Z.P. Contribution of non-isothermal jets to the processes of noise generation of energy machines when installing silences // Akustika. – 2021. – Vol. 41. – P. 30-33.

20. Williams P., Kirby R., Hill J., Abom M., Malecki C. Reducing low frequency tonal noise in large ducts using a hybrid reactive-dissipative silencer. Applied Acoustics. – 2018. – Vol. 131. – P. 61-69.

Статья поступила в редакцию 23.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК: 614.84
EDN: WOBNPV

МНОГОСЛОЙНАЯ БИОТКАНЕВАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 5658-8961
AuthorID: 981025
ORCID: 0000-0002-3239-0758
ScopusID: 57212554371

СЕРГЕЕВА Маргарита Дмитриевна, аспирант
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: antonova.md@edu.spbstu.ru)
SPIN: 9473-1733
AuthorID: 693078
ORCID: 0000-0003-0833-6863
ScopusID: 57212259662

КОЛЕСНИКОВ Евгений Юрьевич, доктор технических наук, доцент,
профессор Высшей школы техносферной безопасности
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, e-mail: key3108@ya.ru)

Аннотация. В статье представлена модель сопряженных процессов переноса инфракрасного излучения и теплопередачи в двуслойной структуре, имитирующей кожу (1 мм) и мышечную ткань (20 мм). В качестве источника рассматриваются либо серое тело (нагретая керамическая поверхность), либо пламя углеводородов, спектральные характеристики которых заданы аппроксимирующими полиномами. Численное моделирование выполнено в среде *COMSOL Multiphysics* на основе интерфейсов “Heat Transfer in Solids” и “Surface-to-Surface Radiation”, что позволило верифицировать модель по аналитическим зависимостям и экспериментальным данным. Модель обеспечивает прогноз распределения температурного поля во времени (0-11 мин) и глубине (0-21 мм), а также позволяет определить моменты достижения пороговых температур ожогов I-III степени. В ходе проведенного исследования была разработана и апробирована математическая модель переноса тепла в многослойной биоткани в инфракрасном диапазоне и прошла проверку на соответствие как классическим аналитическим формулам по Фурье/Пеннесу, так и экспериментальным данным из литературы. В результате проведенного исследования была исследована чувствительность модели, при этом установлено, что наиболее значимыми факторами в процессе теплового воздействия для структуры «кожа (1 мм) – мышечная ткань (20 мм)» являются интенсивность излучения, толщина слоев, теплопроводность тканей и наличие радиационного компонента. Полученные результаты могут быть использованы для оценки тепловых рисков при пожарах и аварийном нагреве, разработки систем пассивной защиты и подбора термостойких материалов для критически важных объектов.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, теплопередача, *COMSOL Multiphysics*, техносферная безопасность, пожарная безопасность.

MULTI-LAYER FABRIC MODEL TRANSMISSION OF INFRARED RADIATION

© The Author(s) 2025

SERGEEVA Margarita Dmitrievna, postgraduate student
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: antonova.md@edu.spbstu.ru)
KOLESNIKOV Evgeniy Yuryevich, doctor of technical sciences, docent,
professor of the Higher School of Technosphere Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, st. Politekhnicheskaya, 29, e-mail: key3108@ya.ru)

Abstract. The paper presents a model of coupled infrared radiation transfer and heat conduction processes within a two-layer structure simulating human skin (1 mm) and muscle tissue (20 mm). The radiation source is considered to be either a gray body (heated ceramic surface) or a hydrocarbon flame, with spectral characteristics defined using approximating polynomials. Numerical simulations were conducted in the *COMSOL Multiphysics* environment using the "Heat Transfer in Solids" and "Surface-to-Surface Radiation" interfaces, enabling the model to be verified against both analytical dependencies and experimental data. The model provides a prediction of the temperature field distribution over time (0-11 minutes) and depth (0-21 mm), and allows for the determination of time points at which threshold temperatures corresponding to first-, second-, and third-degree burns are reached. The results obtained can be applied for thermal risk assessment in fire and emergency heating scenarios, the development of passive protection systems, and the selection of heat-resistant materials for critical infrastructure.

Keywords: infrared radiation, heat transfer, *COMSOL Multiphysics*, technosphere safety, fire safety.

Для цитирования: *Сергеева М.Д. Многослойная биотканевая модель переноса инфракрасного излучения / М.Д. Сергеева, Е.Ю. Колесников // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 193-202. – EDN: WOBNPV.*

Введение. Современные задачи техносферной безопасности требуют глубокого понимания механизмов теплового воздействия на биологические ткани. Особое значение приобретают модели, позволяющие количественно оценивать степень повреждений, вызванных инфракрасным (ИК) излучением. Процессы облучения тканей ИК излучением и сопровождающего теплопереноса описываются сочетанием уравнения теплового баланса (проф. Пеннса) и законов радиационного переноса (Планка, Стефан-Больцмана). Модели обычно включают теплопроводность Фурье с учётом перфузии крови и источников тепла в тканях. Поскольку при горении органических веществ источники тепла (температура пламени ≈ 1300 K) преимущественно излучают в ИК-диапазоне, такое излучение проникает глубоко в кожу и мышцы, создавая дополнительные нагрузки на теплообмен тканей [9]. В условиях, когда высокотемпературные среды и пламя действуют на организм человека, ключевым становится прогнозирование динамики нагрева и возможных ожогов мягких тканей. Ранее было отмечено, что длинноволновое ИК-излучение, характерное для горения углеводородов, является наиболее опасным для человеческого организма, так как проникает глубже в ткани человека [9].

Модели ИК-облучения и теплопередачи активно применяют в задачах пожарной безопасности для прогнозирования ожогов и разработки защитных средств. Так, в результате моделирования, проведенного Lei, Y. и др. (2023), было показано, что периодические движения ткани (имитирующие движение человека) значительно сокращают время наступления ожога II степени – на 33-35% в сравнении с неподвижной одеждой [16]. Полученные выводы необходимы для совершенствования современных огнеупорных костюмов, повышающих эффективность пассивной защиты при тепловом воздействии.

Среди существующих подходов наиболее перспективными являются численные методы, реализующие уравнение переноса биотепла Пеннеса в сочетании с радиационными законами и кинетикой термического разрушения (модель Аррениуса/Генрихса). В ряде научных исследований можно обнаружить интеграцию Пеннесовского уравнения и функции повреждения Генрихса в процесс определения степени ожога по накоплению энергии [12-15]. Решения этих моделей были получены с помощью численных методов, таких как метод конечных разностей и метод конечных элементов. В исследовании Mukaddes, A.M.M. и др. (2018) смоделировали тепловой удар кондукцией, конвекцией и радиацией, оценив интенсивность ожога по интегралу Генрихса [10]. В данном исследовании модель была построена в программном комплексе *COMSOL Multiphysics,* позволяющем строить реалистичные модели многослойных биотканей, учитывать характеристики внешнего теплового воздействия и проводить количественную оценку повреждений. *COMSOL* является особенно популярным инструментом численного моделирования благодаря встроенным интерфейсам биотеплопереноса и радиации. Так, Cheng, Y. и др. (2024) использовали *COMSOL* 6.0 для совместного расчёта биотеплопереноса и испарительной энтальпии тканей при лазерном облучении, обнаружив, что учёт латентной теплоты воды повышает точность моделирования по сравнению с классической моделью [11]. Данные исследования свидетельствуют об актуальности многопланового численного подхода: конечно-элементного и граничного методов, адаптированных под биоткани.

Методология. Математическое моделирование процесса воздействия теплового потока на живую ткань было проведено с использованием программы *COMSOL Multiphysics*. На начальном этапе моделирования использовалось идеализированное излучение от Абсолютно Чёрного Тела (АЧТ) с температурой 1000 K, формирующее пучок квазипараллельных лучей, падающих на мишень через диафрагму диаметром 60 мм. Расстояние между источником и облучаемым образцом кожи составляло 20 см. В дальнейшем были рассмотрены два практических источника – серое тело (нагретая керамическая поверхность) и пламя углеводородов, спектральные характеристики которых были заданы аппроксимирующими полиномами.

Облучаемый образец – двуслойная структура, моделирующая живую ткань:

– кожа 1 мм,

– мышечная ткань 20 мм.

Целью данного исследования является разработка и проверка численной модели теплового воздействия инфракрасного излучения на мягкие ткани человека с целью последующей адаптации для задач техносферной и пожарной безопасности.

Для достижения цели были определены следующие задачи:

1. Построить математическую модель сопряжённого переноса инфракрасного излучения и теплопередачи в многослойной биоткани на основе уравнения Пеннеса и законов Планка-Стефана-Больцмана.

2. Реализовать численное решение модели в среде *COMSOL Multiphysics*, используя модули «Heat Transfer in Solids» и «Surface-to-Surface Radiation».

3. Провести валидацию разработанной модели путём сравнения результатов моделирования с аналитическими решениями и эксперименталь-

ными данными для типовых условий облучения.

4. Смоделировать динамику распределения температурного поля в двуслойной структуре «кожа-мышечная ткань» при различных сценариях инфракрасного облучения (серое тело, пламя углеводородов).

5. Определить критические временные и температурные пороги для возникновения ожогов I-III степени на основе интегральной модели Генрихса.

6. Оценить влияние ключевых входных параметров модели (интенсивность облучения, толщина слоёв, теплопроводность тканей) на вероятность ожоговых повреждений.

Создание математической модели переноса инфракрасного излучения и теплопередачи в образце связано с сочетанным учетом переноса теплоты в пространстве, осуществляемого в результате распространения электромагнитных волн, и теплопередачи по механизму теплопроводности в твердых телах.

В большинстве ситуаций процесс передачи тепла происходит в твердых средах, механизм теплопроводности может быть определен в соответствии с законом Фурье, который устанавливает прямую зависимость между проводящим тепловым потоком q и температурным градиентом. Для решения задачи во временной области, связанной с температурным полем в неподвижном твердом объекте, используется уравнение теплового баланса, которое описывает температурное поле следующим образом [1]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q \quad (1)$$

где ρ – плотность, кг/м^3,

C_p – теплоемкость, Дж/(кг*К),

T –температура, К,

k – теплопроводность, Вт/(м*К),

Q – источник теплоты, Вт.

Радиационный теплообмен (тепловое излучение) связан с двойным преобразованием энергии и происходит в три этапа:

1) первоначально внутренняя энергия источника излучения превращается в энергию электромагнитного излучения (энергию фотонов или квантов);

2) затем лучистая энергия переносится электромагнитными волнами в пространстве, подчиняясь законам преломления, поглощения и отражения;

3) при взаимодействии с веществом происходит переход лучистой энергии во внутреннюю энергию тела путем поглощения фотонов.

Теплообмен излучением характеризуется тепловыми мощностями излучения. Различные виды потоков связаны между собой соотношениями [2]:

$$Q_{исх} = Q_{соб} + Q_{отр} \quad (2)$$

$$Q_{пад} = Q_{погл} + Q_{отр} \quad (3)$$

где, $Q_{исх}$ –мощность излучения, исходящего от поверхности тела, Вт,

$Q_{пад}$ – мощность излучения, падающего на поверхность тела, Вт,

$Q_{соб}$ – мощность собственного излучения тела Вт,

$Q_{отр}$ – мощность излучения, отраженного от поверхности тела, Вт,

$Q_{погл}$ – мощность поглощенного излучения, Вт.

Коэффициент отражения излучения поверхностью может зависеть от угла падения, температуры поверхности и длины волны излучения. У идеального абсолютно черного тела распределение энергии по спектру в зависимости от температуры тела является универсальным, поэтому законы излучения абсолютно черного тела используют в качестве базовых при расчете излучения реальных тел. Закон Планка, устанавливающий зависимость спектральной интенсивности излучения АЧТ от длины волны и абсолютной температуры имеет вид [2]:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1\right]} \quad (4)$$

где $E_{0\lambda}$ – спектральная плотность излучения, Вт/м^3,

λ – длина волны, м,

T – температура, К,

C_1, C_2 – коэффициенты, связанные с универсальными физическими константами следующими соотношениями [2]:

$$C_1 = 2\pi c^2 \quad (5)$$

$$C_2 = hc/k \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме, c=3*10^8 м/с,

h – постоянная Планка, h= 6,626 * 10^{-34} Дж * с – постоянная Планка,

k – постоянная Больцмана, k=1,38*10^{-23} Дж/К.

Закон Стефана-Больцмана – выражение, интегрально описывающее излучение абсолютно чёрного тела во всём электромагнитном диапазоне. Оно выводится из закона Планка интегрированием по частоте или по длине волны. Согласно закону Стефана-Больцмана, – удельная мощность, излучаемая на всех длинах волн, зависит от четвертой степени температуры АЧТ [2]:

$$E_0 = \int_0^\infty E_{0\lambda}\, d\lambda = \sigma * T^4 \quad (7)$$

где E_0 – плотность потока собственного излучения абсолютно черного тела, Вт/м^2,

T – температура, К,

σ – постоянная Стефана-Больцмана 5,67*10^{-8} Вт/м^2*К^4.

Известно, что при воздействии электромагнитного излучения на поверхность некоторого тела часть излучения отражается, а часть проникает внутрь, рассеивается и поглощается. Связь между способностью тела испускать и способностью поглощать энергию излучения определяется законом Кирхгофа.

Согласно данному закону для любого тела на любой длине волны λ электромагнитного излучения отношение спектральной плотности E_λ, Вт/м^2, потока его собственного излучения к коэффициенту спектральной поглощательной способности α_λ этого тела есть величина постоянная, равная спект-

ральной плотности $E_{0\lambda}$, Вт/м^2, потока излучения АЧТ при той же температуре:

$$E_{0\lambda} = E_\lambda / \alpha_\lambda \quad (8)$$

Следствие из этого закона определяет, что в условиях термодинамического равновесия спектральная излучательная способность тела равна его поглощательной способности на той же длине волны и при той же температуре [2]:

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{0\lambda} \quad (9)$$

где, α_λ – спектральная поглощательная способность,

ε_λ – спектральная излучательная способность.

Поглощение энергии ЭМВ телом различается для разных длин волн. На основании экспериментальных данных переноса электромагнитного излучения в коже белого и серого кроликов, рассчитано поглощение ими ЭМВ для диапазона 0,35-2,5 мкм (рис. 1).

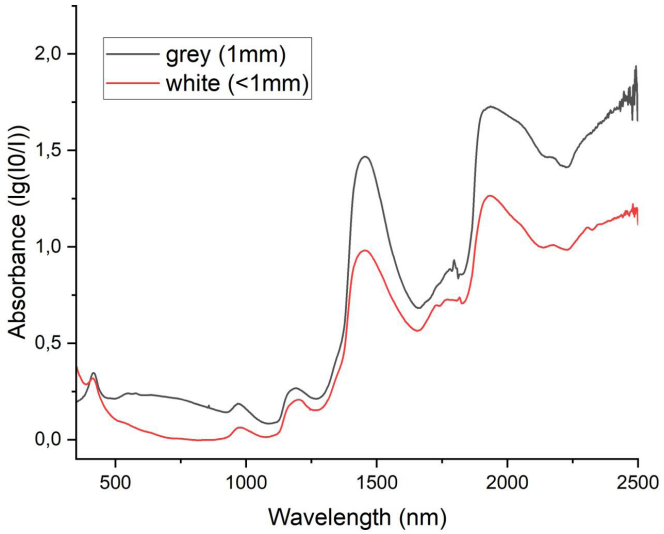


Рисунок 1 – Спектр поглощения для кожи белого и серого кролика

Спектр поглощения двух образцов кожи кролика был получен в Ресурсном центре "Оптические и лазерные методы исследования вещества" Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета на спектрофотометре "Lambda 1050" фирмы Perkin Elme.

Коэффициент поглощения излучения веществом определяется как логарифм отношения мощности падающего к мощности проходящего через образец излучения:

$$A_\lambda = lg\,(I_0 / I) \quad (10)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения, кВт/м^2,

I – интенсивность прошедшего сквозь образец излучения, кВт/м^2.

Для определения совокупной поглощаемой мощности теплового излучения, необходимо учесть его спектральную поглощательную способность (рис. 1). Для этого также необходимо принять во внимание, что спектр мощности падающего излучения в изучаемом диапазоне может иметь сложную форму. Обозначим его $I_{0\lambda}$ (λ). Тогда спектральная поглощённая мощность выражается через:

$$I_{a\lambda}(\lambda) = I_{0\lambda}(\lambda) - I_\lambda(\lambda), \quad (11)$$

где $I_{a\lambda}$ (λ) – спектральная поглощенная мощность поглощения,

I_λ (λ) – мощность прошедшего излучения, что справедливо при условии отсутствия отражения и рассеяния излучения.

Тогда принимая во внимание уравнение (10), интегральная поглощенная мощность перепишется в виде:

$$I_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{a\lambda}(\lambda)\,d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{0\lambda}(\lambda)(1 - 10^{-A_\lambda})\,d\lambda. \quad (12)$$

С учетом сложного спектрального хода поглощательную способность образца, полученную экспериментально, для выполнения расчетов следует задать аппроксимирующей непрерывной кусочно-гладкой функцией. Каждый *i*-й ее отрезок нами аппроксимировался полиномом четвертого порядка, следующего вида:

$$\varphi_i(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + f \quad (13)$$

где

$$d = \frac{(y_i - y_{i+1}) + [a(x_{i+1}^4 - x_i^4) + b(x_{i+1}^3 - x_i^3) + c(x_{i+1}^2 - x_i^2)]}{x_i - x_{i+1}},$$

$$f = y_i - ax_i^4 - bx_i^3 - cx_i^2 - dx_i.$$

В формулах (13) x_i соответствует значению аргумента на левом краю *i*-го отрезка, y_i соответствует значению функции на левом краю *i*-го отрезка, x_{i+1} соответствует значению аргумента на правом краю *i*-го отрезка, y_{i+1} – соответствует значению функции на левом краю *i*-го отрезка.

Аппроксимация производилась на *Python* с использованием функции *Curve_fit* библиотеки *SciPy*. Полученные результаты представлены на рисунках 2 и 3 (соответственно для серого и белого кролика).

Отрезки разбиения исследуемого интервала длин волн и соответствующие полиномиальные

коэффициенты представлены ниже для кожи серого кролика (КСК) и для кожи белого кролика (КБК).

Для серого кролика:

1) $\lambda \in [0.35\ \mu m, 0.505\ \mu m]$; a=4911.32618418, b=-8241.85352715, c=5139.47964988;

2) $\lambda \in [0.505\ \mu m, 0.905\ \mu m]$; a=-9.48050545, b=29.25486037, c=-34.20263847;

3) $\lambda \in [0.905\ \mu m, 1.27\ \mu m]$; a=-292.28198784, b=1262.05558789, c=-2031.44421685;

4) $\lambda \in [1.27\ \mu m, 1.66\ \mu m]$; a=1129.30682363, b=-6631.53305253, c=14534.89682373;

5) $\lambda \in [1.66\ \mu m, 1.937\ \mu m]$; a=-1471.90552508, b=10615.86110654, c=-28663.71551582;

6) $\lambda \in [1.937\ \mu m, 2.4\ \mu m]$; a=-95.60904959, b=837.90973263, c=-2743.49416005.

Для белого кролика:

1) $\lambda \in [0.35\ \mu m, 0.975\ \mu m]$; a=7.52893615, b=-21.44407296, c=24.15445653;

2) $\lambda \in [0.975\ \mu m, 1.2\ \mu m]$; a=-982.4242668, b=4269.88961785, c=-6936.86114161;

3) $\lambda \in [1.2\ \mu m, 1.655\ \mu m]$; a=347.51090586, b=-2027.38178932, c=4406.77767517;

4) $\lambda \in [1.655\ \mu m, 1.93\ \mu m]$; a=-581.56680404, b=4239.77008978, c=-11565.2264274;

5) $\lambda \in [1.93\ \mu m, 2.43\ \mu m]$; a=-51.05013902, b=443.08391882, c=-1435.38862184;

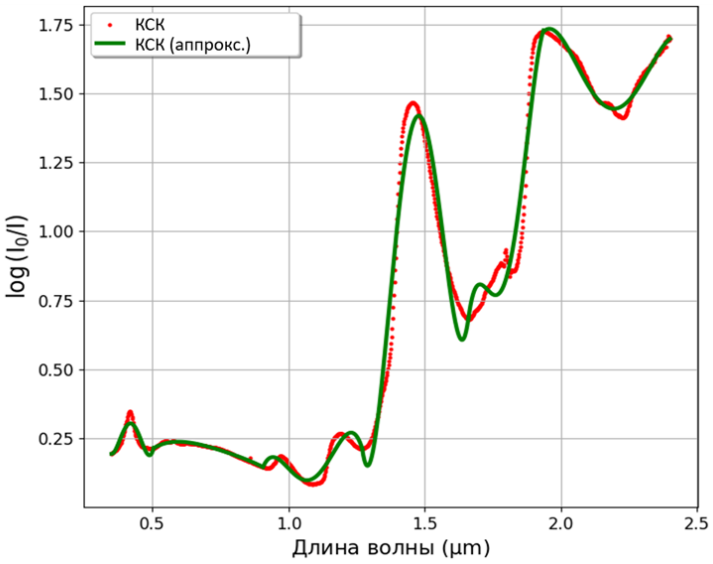


Рисунок 2 – Спектр поглощения для кожи серого кролика и его аппроксимация

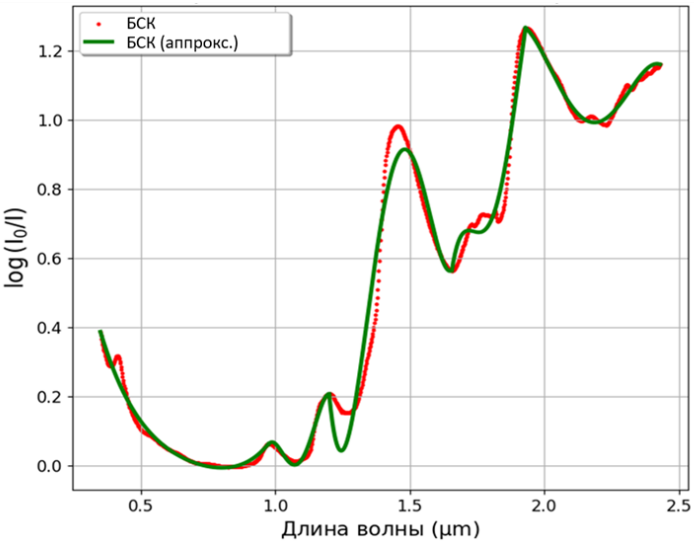


Рисунок 3 – Спектр поглощения для кожи белого кролика и его аппроксимация

Для создания модели применяется интерфейс «Heat Transfer with Surface-to-Surface Radiation» в среде *COMSOL Multiphysics* [3]. Данный интерфейс позволяет использовать мультифизическую связь для объединения теплопередачи излучением на границах и теплопередачу в твердых телах. Интерфейс излучения рассматривает тепловое излучение как передачу энергии между границами и внешними источниками тепла, при которой воздушная среда не участвует в излучении (прозрачная среда). Интерфейс Heat Transfer in Solids используется для моделирования теплопередачи в твердых

телах за счет теплопроводности. Уравнение теплопроводности, определенное в твердых областях, соответствует дифференциальной форме закона Фурье (1).

В то же время, модуль Surface-to-Surface Radiation решает следующие уравнения, описывающие баланс излучательных мощностей в системе:

$$J_i = \varepsilon_i e_b(T)\, FEP_i(T) + \rho_{d,i} G_i, \quad (14)$$

$$G_i = G_{m,i} + G_{ext,i}, \quad (15)$$

$$e_b(T) = \sigma T^4, \quad (16)$$

$$FEP_i(T) = \frac{15}{\pi^4} \int_{c_2/(\lambda_{i-1}T)}^{c_2/(\lambda_i T)} \frac{x^3}{1 - e^x}\, dx, \quad (17)$$

где индекс i указывает на то, что величина соответствует i-ой части спектра, ε_i – спектральная излучательная способность тела, $e_b(T)$ – интегральная интенсивность излучения АЧТ, $FEP_i(T)$ – интеграл функции Планка для i-го участка спектра, $\rho_i = 1 - \varepsilon_i$ – диффузный спектральный коэффициент отражения, G_i – спектральная интенсивность падающего на поверхность излучения, J_i – интенсивность исходящего с поверхности излучения, $G_{m,i}$ – интенсивность падающего излучения от других источников в системе, $G_{ext,i}$ – интенсивность падающего излучения от внешних источников. Геометрия модели представлена на рисунке 4. Сверху расположен источник излучения, снизу облучаемым образец длиной 100 мм.

Источник представлен в виде диафрагмы диаметром 60 мм, через которую падает поток квазипараллельных лучей.

Для моделирования теплопередачи в образце заданы теплоемкость и теплопроводность слоев живой ткани. На нижней и боковых границах облучаемого образца задано условие постоянной температуры $T = T_amb$. Начальная температура облучаемого образца равна T_amb. Для источника излучения (диафрагма) определена средняя температура.

В таблице 1 представлены основные параметры, заданные в модели.

Теплопередача излучением осуществляется между диафрагмой и верхней границей облучаемого образца. На поверхности диафрагмы и кожи задано граничное условие «Отражающая поверхность», необходимое для определения радиационного теплового потока для непрозрачных поверхностей.

В предлагаемой модели вместо АЧТ в качестве источника излучения мы рассматриваем два варианта: а) нагретую керамическую поверхность, б) пламя углеводородов. Сведения о спектральном коэффициенте излучения для пламени углеводородов взяты нами из статей [5, 6].

Для выполнения расчетов спектр пламени углеводородов был задан аппроксимирующей непрерывной кусочно-гладкой функцией по формуле (13) (рис. 5). Коэффициенты составили:

a_1 = -0.6206645059063088, b_1 = 3.950815849634449, $c1$ = -8.508302414093915;

a_2 = 0.07886749406287828, b_2 = -0.9333742871044313, $c2$ = 3.938516431342567;

a_3 = 0, b_3 = 0, c_3 = -12.1201706526804.

Диапазоны длин волн: 1) [0.479, 2.47]; 2) [2.47, 4.2]; 3) [4.2, 4.79] (все значения в мкм).

Для нагретой керамической поверхности будет рассмотрена модель серого тела с коэффициентом излучения 0.95.

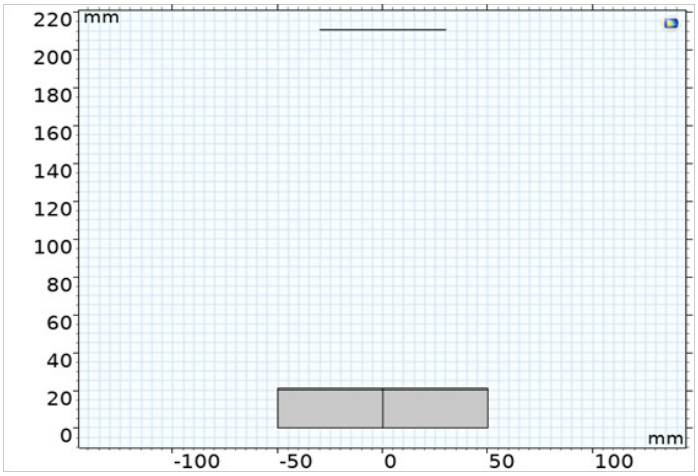


Рисунок 4 – Геометрия модели

Таблица 1 – Основные параметры

Наименование параметра	Выражение	Описание
T_source	1000 C	Усредненная температура источника
T_amb	293,15 K	Температура окружающей среды
Cp_muscle	3421 J/(kg*K)	Теплоемкость мышечной ткани
k_muscle	0,49 W/(m*K)	Теплопроводность мышечной ткани
Cp_skin	3391 J/(kg*K)	Теплоемкость кожи
k_skin	0,37 W/(m*K)	Теплопроводность кожи

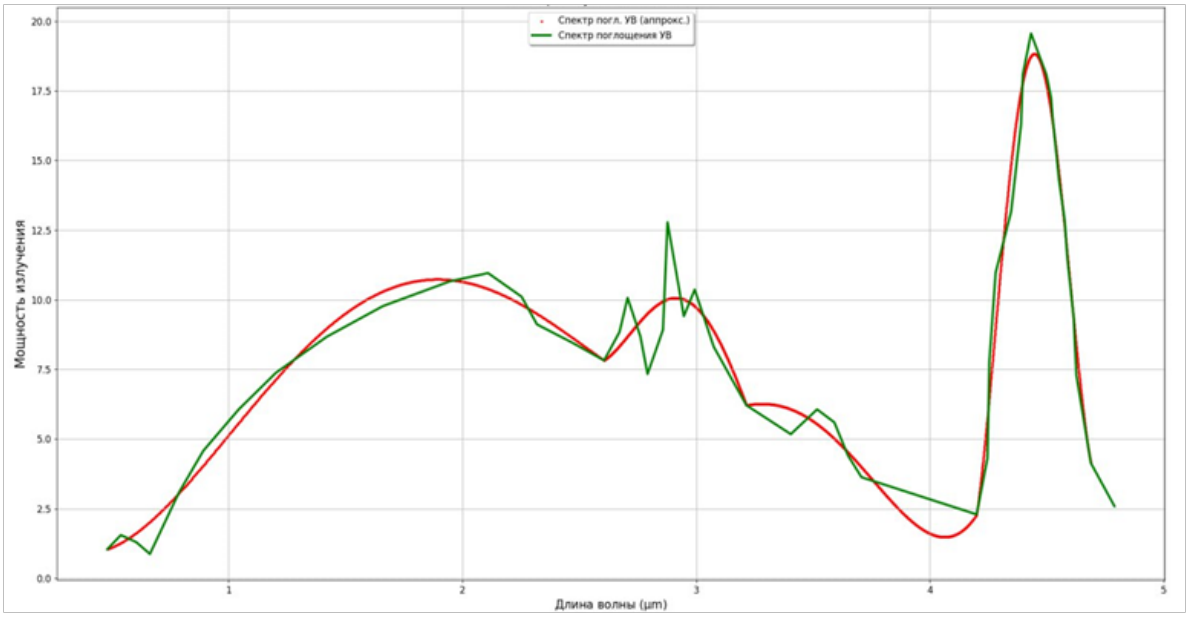


Рисунок 5 – Спектр излучения пламени углеводородов

Для отражающей поверхности, решаются уравнения (14-18), рассмотренные в пункте 1.1. На нижней границе мышечной ткани определена температура окружающей среды. При этом удельная спектральная мощность излучения источника автоматически рассчитывается для каждой спектральной полосы в зависимости от конечных точек полосы и температуры поверхности. Температура окружающей среды задавалась на нижней границе мышечной ткани. Удельная спектральная мощность излучения источника автоматически рассчитывалась *COMSOL Multiphysics* для каждой полосы спектра в зависимости от температуры и границ интервала. Спектральная отражательная способность поверхности кожи была задана в виде функции длины волны с использованием табличных данных, соответствующих нормальной эмиссии и отражению в *ИК*-диапазоне для биологических тканей.

Из выражения (9) известно, что коэффициент поглощения поверхности кожи равен спектральной излучательной способности поверхности кожи. Поэтому излучательная способность кожи (образца) задана через функцию поглощательной способности, найденную в пункте 1.3. Спектральный диапазон для функции поглощательной способности составляет от 0,35 мкм. до 2,5 мкм. Моделирование проводится с шагом длины волны 100 нм. Согласно выполненным по описанной модели расчетам, суммарная интенсивность падающего на образец теплового потока составляет 4000 Вт/м^2 – для случая, когда источником нагрева служит керамический объект, который излучает тепло как серое тело, и соответственно 1600 Вт/м^2 – для случая, когда источником излучения является пламя углеводородов.

Результаты. Расчет тепловой модели выполнен для интервала времени от 0 до 11 минут. В результате численного моделирования получено распределение температуры живой ткани, сверху слой кожи 1 мм, снизу мышечная ткань 20 мм.

На рисунках 6, 7 представлено распределение температуры центрального участка образца (длина 100 мм) для времени 4 и 9 минут при нагревании от керамики.

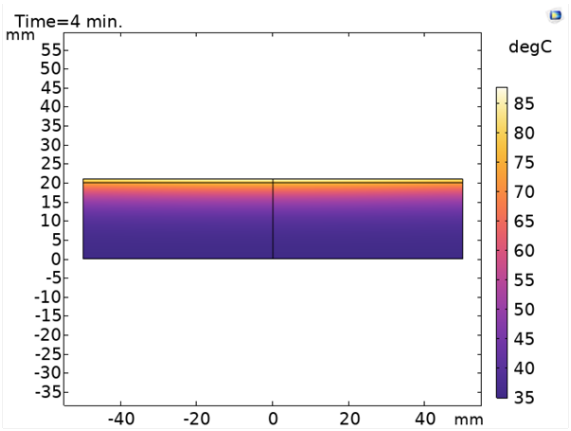


Рисунок 6 – Распределение температуры живой ткани в момент времени 4 минуты (керамика)

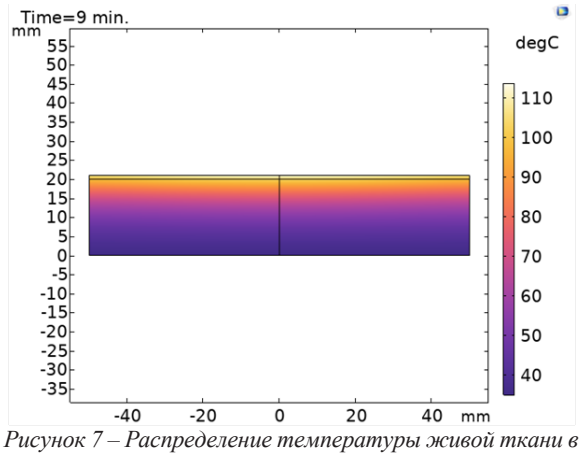


Рисунок 7 – Распределение температуры живой ткани в момент времени 9 минут (керамика)

На рисунках 8, 9 представлено распределение температуры центрального участка образца (длина 100 мм) для времени 4 и 9 минут при нагревании от пламени углеводородов.

С целью сравнения температуры на поверхности кожи и на границе кожи и мышечной ткани построены зависимости максимальной температуры от времени (рис. 10) в случае нагретого керамического источника. Нагрев мышечной ткани происходит в результате теплопередачи от кожи. На графике отмечены точки, при которых достигается температура нас-тупления ожогов 1, 2 и 3 степени, а именно: 51°C, 55°C и 60°C.

На рисунке 11 представлена зависимость температуры поверхности кожи и верхнего слоя мышечной ткани для случая нагрева от пламени УВ.

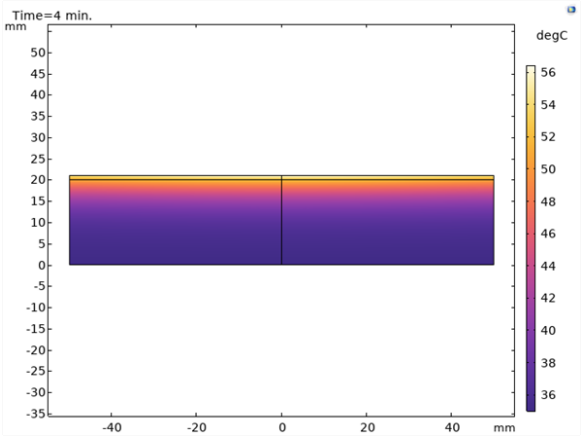


Рисунок 8 – Распределение температуры живой ткани в момент времени 4 минуты (УВ)

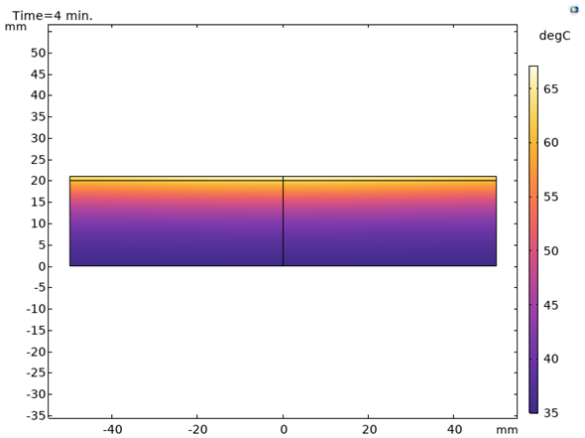


Рисунок 9 – Распределение температуры живой ткани в момент времени 9 минуты (УВ)

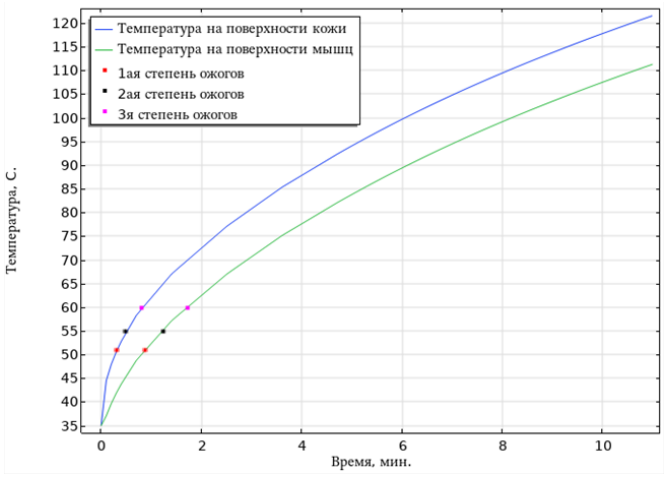


Рисунок 10 – Температура поверхности кожи и мышечной ткани от времени при нагреве от керамики

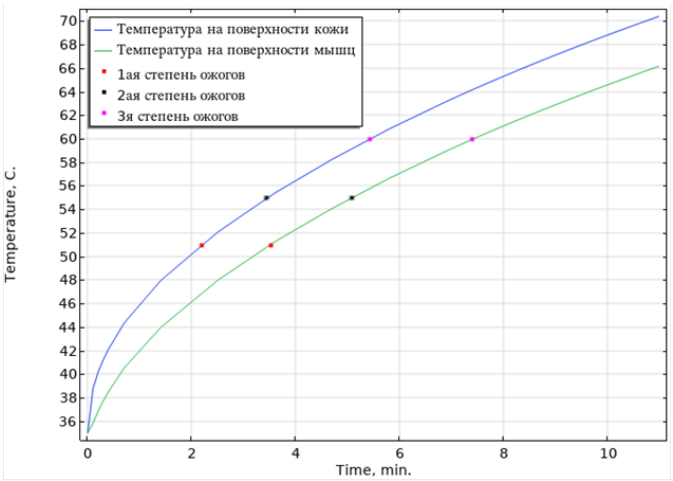


Рисунок 11 – Температура поверхности кожи и мышечной ткани от времени при нагреве от пламени углеводородов

На рисунке 12 показано распределение температуры на разной глубине живой в разные моменты времени (керамический излучатель).

Участок кожи находится в координатах 0-1 мм, а участок мышечной ткани 1-21 мм. Профили температуры построены для 4 моментов времени: 3, 6, 9, 11 минут.

На рисунке 13 показано распределение температуры на разной глубине живой в разные моменты времени (УВ).

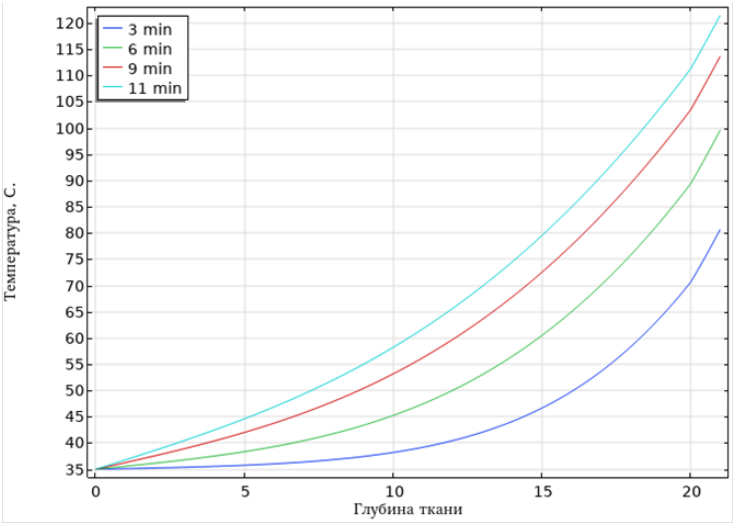


Рисунок 12 – Распределение температуры на разной глубине живой ткани в разные моменты времени (керамика)

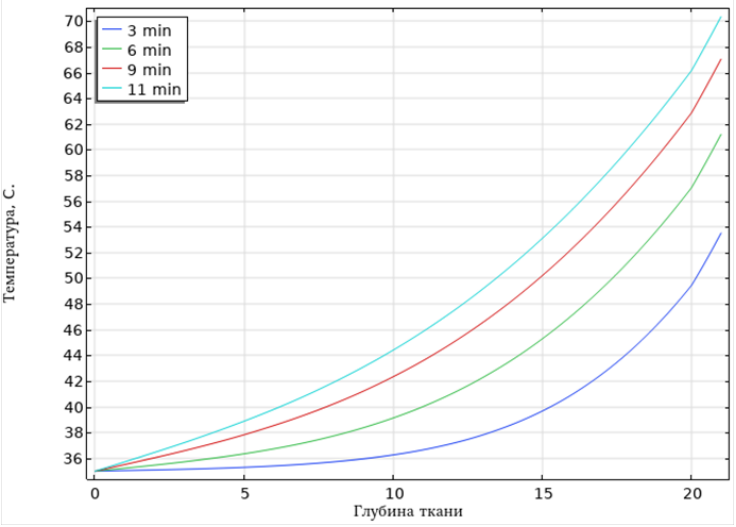


Рисунок 13 – Распределение температуры на разной глубине живой ткани в разные моменты времени (УВ)

Обсуждение. В ходе проведенного исследования была разработана и апробирована математическая модель переноса тепла в многослойной биоткани в инфракрасном диапазоне и прошла проверку на соответствие как классическим аналитическим формулам по Фурье/Пеннесу, так и экспериментальным данным из литературы. В результате проведенного исследования была исследована чувствительность модели, при этом установлено, что наиболее значимыми факторами в процессе теплового воздействия для структуры «кожа (1 мм) – мышечная ткань (20 мм)» являются:

1) интенсивность излучения – с увеличением плотности теплового потока с 2 кВт/м² до 10 кВт/м² время достижения порогов I-III степеней ожога сокращается более чем в 3 раза, что согласуется с результатами Mukaddes, A.M.M. и др. (2018) для подобных сценариев в *COMSOL*;

2) толщина слоев – увеличение толщины эпидермиса даже на 0,2 мм даёт заметное снижение максимальной температуры в мышечной ткани (~5°C), что может отдалить момент возникновения ожога III степени на 15-20% времени облучения;

3) теплопроводность тканей – вариации коэффициента теплопроводности ±20% меняют скорость распространения теплового фронта в пределах 10-12%, что сопоставимо с разбросом в экспериментальных значениях для тканей человека;

4) наличие радиационного компонента – при сценариях пламени углеводородов (температура ≈1300 K) вклад радиационного переноса доходит до 35% от общего теплового потока на поверхнос-

ти, что подчёркивает ограниченность моделей, включающих только кондукцию/конвекцию.

Основным ограничением остается упрощённая структура биоткани (две однородные прослойки) и отсутствие учёта перфузии крови, которая в реальных условиях оказывает существенное охлаждающее действие. В дальнейшем планируется расширить модель до трёхслойной (эпидермис-дермажировая клетчатка) с учётом кровоснабжения и фазовых переходов, а также адаптировать её под сценарии динамического движения человека в зоне пожара.

Выводы. В результате проведенного исследования была разработана математическая модель сопряжённого переноса ИК-излучения и теплопередачи на основе уравнения Пеннеса и законов Планка-Стефана-Больцмана, реализованная в *COMSOL Multiphysics*. Численные результаты моделирования согласуются с аналитическими решениями и экспериментальными данными для типовых сценариев облучения. Модель позволяет прогнозировать распределение температур во времени и глубине в двуслойной структуре «кожа–мышечная ткань» при различных источниках ИК-излучения. Расчёты по интегральной модели Генрихса дали временные пороги достижения ожогов I-III степени, демонстрируя чувствительность к интенсивности облучения и толщине слоёв.

Полученные данные могут быть использованы при проектировании пассивных защитных систем, выборе термостойких материалов и формировании нормативов для оценки рисков тепловых воздействий на критические объекты и людей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Understand, Predict, Innovate, Optimize. About the COMSOL Product Suit. [Электронный ресурс]. URL: https://www.comsol.com (дата обращения: 06.05.2025).

2. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 433 с.

3. Heat Transfer with Surface-to-Surface Radiation. [Электронный ресурс]. URL: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/heat_ug_multiphysics_features.12.15.html (дата обращения: 06.05.2025).

4. Diffuse Surface (Surface-to-Surface Radiation Interface) [Электронный ресурс]. URL: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.heat/heat_ug_ht_features.09.044.html (дата обращения: 06.05.2025).

5. Bauer, W. Emissivities of ceramic materials for high temperature processes / W. Bauer, A. Moldenhauer, A. Platzer // // Optical Diagnostics. – SPIE, 2005. – T. 5880. – C. 263-272.

6. Arens, E.E. calibrated hydrogen flame spectrum / E.E. Arens, R.C. Youngquist, S. Starr. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – V. 39 (17). – P. 9545-9551.

7. Plyler, E.K. Infrared emission spectra of flames / E.K. Plyler, C.J. Humphreys // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1948. – V. 40 (6). – P. 449.

8. Wark, K. Jr. Infrared Emission Spectra of Two-Stage Hydrocarbon Flames / K. Jr. Wark, J. Agnew, W. Agnew // Industrial & Engineering Chemistry Chemical & Engineering Data Series. – 1958. – V. 3 (2). – P. 313-322.

9. Kolesnikov, E. Improving the approach to assessing and rationing the effects of heat flow in a fire on the human body / E. Kolesnikov, M.D. Sergeeva, A.P. Byzov, B.Kh. Norov // BIO Web of Conferences. – 2024. – V. 105 (4). – P. 01007.

10. Mukaddes, A.M.M. A simulation study of bio-heat transfer in human skin under different burning conditions / A.M.M. Mukaddes, M.R. Jaher, D. Roy, R. Shioya // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1980 (1). – P. 050002.

11. Cheng, Y. Theoretical and Experimental Analysis of the Effect of Vaporization Heat on the Interaction between Laser and Biological Tissue / Y. Cheng, Y. Shen, Y. Gao, Y. Wen, Z. Lv, E. Wang, M. Wang, S. Zhang, Y. Bo, Q. Peng // Applied Sciences. – 2024. – V. 14 (10). – P. 4333.

12. Diller, K.R. A mathematical model for the thermal efficacy of cooling therapy for burns / K.R. Diller, L.J. Haynes, C.R. Baxter // Journal of Burn Care and Rehabilitation. – 1983. – V. 4. – P. 81-89.

13. Ng, E.Y.K. Prediction of skin burn injury. Part 1. Numerical modeling / E.Y.K. Ng, L.T. Chua // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H Journal of Engineering in Medicine. – 2002. – V. 216. – P. 157-170.

14. Ng, E.Y.K. Mesh independent prediction of skin burns injury / E.Y.K. Ng, L.T. Chua // Journal of Medical Engineering & Technology. – 2000. – V. 24. – P. 255-261.

15. Ng, E.Y.K. Quick numerical assessment of skin burn injury with spreadsheet in PC / E.Y.K. Ng, L.T. Chua // Journal of Mechanics in Medicine and Biology. – 2001. – V. 1. – P. 1-10.

16. Lei, Y. An Extended Model for Analyzing the Heat Transfer in the Skin-Microenvironment-Fabric System during Firefighting / Y. Lei, F. Wang, J. Yang // Materials. – 2023. – V. 16 (2). – P. 487.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.45
EDN: AYWSFW

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТРУДА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

©Автор(ы) 2025
SPIN: 9499-2266
AuthorID: 300968
ORCID: 0000-0002-6759-7863
ГОРБУНОВА Ольга Владимировна, доцент, кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Техносферная безопасность»
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: yolga73@mail.ru)
SPIN: 4944-2360
AuthorID: 1035858
ORCID: 0000-0001-6840-6865
НАМ Галина Евгеньевна, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: yamibum@gmail.com)
Scopus ID: 57128607900
AuthorID: 403133
ORCID: 0000-0001-9032-5084
ПАДЕРНО Павел Иосифович, профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ,
профессор кафедры «Информационных систем»
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)
(197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: pipaderno@list.ru.)

Аннотация. В течение последнего десятилетия увеличивается потребность в цифровизации различных областей жизнедеятельности человечества, в том числе для осуществления контроля за безопасностью труда работников как в промышленности, так и в других сферах экономической деятельности. В строительной отрасли широкое развитие получило применение технологий информационного моделирования (ТИМ), для организации проектирования, удобства обмена информацией в рамках проекта, контроля сроков строительства и многих других задач. Сфера применения ТИМ со временем расширилась и нашла своё приложение и в области безопасности труда. ТИМ послужили платформой для совершенствования системы управления охраной труда на строительных площадках и создания цифровой системы мониторинга безопасности труда. В рамках исследования рассматривается человеко-машинная система (ЧМС) на строительной площадке, для которой даны характеристики её состояния, с точки зрения безопасности труда. В зависимости от определённых состояний пребывания системы приведены экономические показатели, характеризующие целесообразность тех или иных мероприятий в области обеспечения безопасности труда. Введено понятие среднего дохода за пребывание объекта в каждом конкретном состоянии, дающее возможность оценить экономическую эффективность от принятых мер, направленных на улучшение безопасности труда работников в строительной отрасли. Приведены результаты натурных исследований по отдельным критериям контроля безопасности труда на строительной площадке объекта жилого строительства. Дана оценка экономической эффективности затрат на внедрение цифровой системы мониторинга за безопасностью труда, представлены результаты расчёта предотвращенного ущерба от предполагаемой аварии грузоподъемного крана, повлекшей гибель работника.

Ключевые слова: безопасность труда, цифровизация, цифровая система мониторинга безопасности труда, предотвращенный ущерб, экономическая эффективность, технологии информационного моделирования (ТИМ).

EVALUATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF INNOVATIVE DIGITAL SOLUTIONS FOR SAFETY MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

© The Authors 2025
GORBUNOVA Olga Vladimirovna, assistant professor, candidate of biological sciences,
assistant professor of the department «Technosphere Safety»
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: yolga73@mail.ru)
NAM Galina Evgenievna, senior teacher of the department «Technosphere Safety»
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: yamibum@gmail.com)

PADERNO Pavel Iosifovich, professor, doctor of technical sciences, honored scientist of the Russian Federation, professor of the department «Information Systems»
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(*197022, Russia, Saint Petersburg, Professor Popov street 5, e-mail: pipaderno@list.ru)*

Abstract. Over the past decade, there has been an increasing demand for the digitalization of various areas of human activity, including the implementation of labor safety control for workers in both industry and other sectors of economic activity. In the construction industry, the use of Building Information Modeling (BIM) technologies has gained significant traction for organizing design processes, facilitating information exchange within projects, monitoring construction timelines, and addressing many other tasks. The scope of BIM applications has gradually expanded to include labor safety. BIM has served as a platform for improving the occupational safety management system on construction sites and creating a digital monitoring system for labor safety. This study examines a human-machine system (HMS) on a construction place, providing characteristics of its state in terms of labor safety. Depending on specific states of the system, economic indicators are presented that characterize the feasibility of various measures aimed at ensuring labor safety. The concept of average income during the object's presence in each specific state is introduced, allowing for an assessment of the economic efficiency of measures taken to improve labor safety for workers in the construction industry. Results from field studies on specific criteria for labor safety control at a residential construction place are presented. An evaluation of the economic efficiency of expenditures on implementing a digital monitoring system for labor safety is provided, along with results from calculations of prevented damage from a potential accident involving a lifting crane that could result in worker fatalities.

Keywords: labor safety, digital labor safety monitoring systems, prevented damage, economic efficiency, Building Information Modeling (BIM) technologies.

Для цитирования: *Горбунова О.В. Оценка экономической эффективности применения инновационных цифровых решений в системе управления безопасностью труда в строительной отрасли / О.В. Горбунова, Г.Е. Нам, П.И. Падерно // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 203-212. – EDN: AYWSFW.*

Введение. В современной производственной деятельности требуется оценивать эффективность всех бизнес-процессов, в том числе в области безопасности труда [1, 2]. Следует отметить, что оценку эффективности деятельности в области охраны труда и обеспечения требований безопасности трудовых процессов в нашей стране начали проводить в относительно недавний период времени.

В период восстановления нашей страны в послевоенные годы вплоть до начала двухтысячных годов, было принято считать, что затраты на охрану труда не окупаются. Убеждение в убыточности, финансирование охраны труда по остаточному принципу, бытовало до недавнего времени. Однако, на сегодняшний день, на многих крупных предприятиях РФ наблюдается смена парадигмы «убыточности» мероприятий в области обеспечения безопасности труда на концепцию «успешности», в том числе связанную с переходом к цифровизации системы управления охраной труда (далее СУОТ).

Этапы развития СУОТ на предприятиях страны прошли путь от, так называемой, «реактивной» системы управления ОТ, которая базировалась на принципе реагирования на происшедшие негативные события, до создания «проактивных» форм управления, нацеленных на превентивность. Такому динамичному переходу от одной формы управления ОТ к другой способствовало изменение законодательства РФ во всех сферах деятельности предприятий. Государством были созданы условия «невыгодности» деятельности организаций и предприятий, которые относятся к высокой степени риска для здоровья персонала [3-5].

В строительной отрасли долгое время наблюдалась тенденция «замедленного» развития СУОТ. Это было связано, в первую очередь, с спецификой деятельности строительных компаний, базирующейся на работе с большим количеством подрядных и субподрядных организаций, за которыми очень сложно уследить на строительных площадках.

В настоящем, в строительстве отмечается стремительный переход на «цифровые формы» организации СУОТ, эта трансформация была связана, в первую очередь, с Указом Президента РФ и Постановлением Председателя Правительства РФ [6-8]. Цифровизация системы обеспечения безопасности труда в строительной отрасли направлена на своевременное выявление нарушений требований законодательства РФ и предупреждение травматизма и профзаболеваний в отрасли. Так по данным Росстат, за период 2020-2024 гг. строительная отрасль по количеству травм со смертельным исходом занимала 2 место после добывающей промышленности, среди отраслей экономики в РФ [9].

Методология. Целью данной статьи является оценка экономических показателей для обоснования преимуществ использования цифровых технологий в осуществлении контроля за безопасностью труда в строительной отрасли.

В данном исследовании применяли методы моделирования, теории нечетких множеств, математического анализа и статистики.

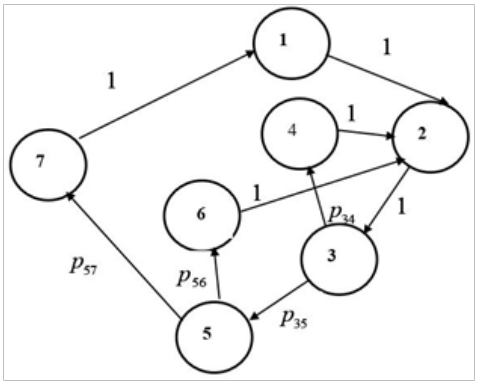
В строительной отрасли структура системы

управления охраной труда как правило единообразна, это связано с особенностями протекания процессов взаимодействия между застройщиком и подрядными организациями, осуществляющими деятельность на строительной площадке. Ранее, в статье О. В. Горбунова, Г. Е. Нам, П. И. Падерно // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 4(64). – С. 229-238. – EDN: DJONTF, была подробно рассмотрена специфика особенностей организации системы контроля состояния и условий безопасности труда на строительных площадках. Были установлены состояния рассматриваемой системы человек-машина-окружающая среда (далее ЧМС), такие как: идеальное – состояние 1; допустимое – состояние 2; переходное – состояние 3; предаварийное – состояние 4; отказ (авария или ЧП) – состояние 5. Приведено подробное описание процесса переходов из одного состояния в другое с помощью матриц переходов и матриц условных времен пребывания системы в этих состояниях для полумарковского процесса.

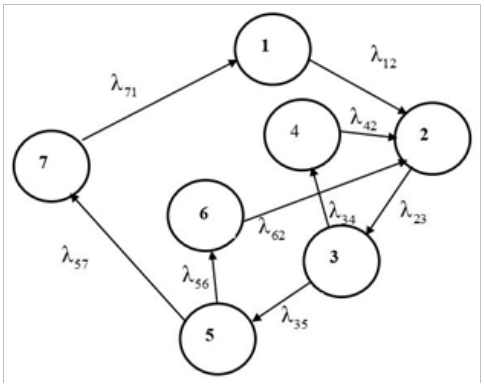
Для дальнейшего рассмотрения вопросов экономической выгодности (целесообразности) применения подходов, основанных на стратегии использования системы информационной поддержки (далее СИП) принятия решений для контроля безопасности труда на строительной площадке, необходимо привести граф 1 – состояния объекта и вероятности переходов и граф 2 – состояний и интенсивности переходов (рис. 1*а, б*), описанные в статье О. В. Горбунова, Г. Е. Нам, П. И. Падерно // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 8(284). – С. 17-26. – EDN: JFPSIQ. Было дано понятие коэффициента опережающего предотвращения рисков – Копр, который может быть численно равен значениям вероятностей p_{34} и p_{56}.

Для определения состояния системы ЧМС и уровня Копр предлагается применять комплекс датчиков и фото-видео фиксацию, позволяющих регистрировать параметры изменения состояния системы, а для обработки поступающей информации применять алгоритмы искусственного интеллекта. Потребителями поступающей информации будут лица принимающие решения – (далее ЛПР), это могут быть: специалисты по охране труда и промышленной безопасности, ИТР такие как начальник участка, прораб (и др. назначенные лица), которые могут оперативно получать информацию на носимые устройства (планшеты, смартфоны и др.). Информация о состоянии ЧМС в режиме реального времени будет отображаться на платформе цифрового двойника (далее – ЦД) объекта строительства. Требования к ЦД изложены в статье Г. Е. Нам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 4(68). – С. 224-229. – EDN: DDRBDW.

Для раннего предупреждения работников, попавших в ситуацию, когда ЧМС начинает осуществлять переход из состояния 2 – допустимое, в состояние 3 – переходное, предлагается использовать системы оповещения, например, смарт-браслеты, смартфоны, и др. Таким образом ЛПР сможет, с помощью СИП, принимать превентивные меры и сообщать о необходимости соблюдения требований безопасности на строительной площадке.



а) граф 1



б) граф 2

Рисунок 1 – Графы состояния объекта: а) вероятности переходов – p_{ij}; б) интенсивности переходов – λ_{ij}

Анализ доходов, расходов, штрафов. Для рассмотрения экономических показателей, которые будут характеризовать ранее упомянутые состояния системы ЧМС необходимо ввести понятие условного дохода за единицу времени – D_i, так:

1. Система работает в идеальных, с точки зрения безопасности труда, условиях. Условный доход за единицу времени работы – D_1.

2. Система работает в допустимых, с точки зрения безопасности труда, условиях. Условный доход за единицу времени работы – D_2.

3. Система работает в допустимых, но практически граничных, с точки зрения безопасности труда, условиях. Возможно принятие решения о проведении некоторых мероприятий по улучшению условий труда. Условный доход за единицу времени работы – D_3.

4. Состояние превентивного улучшения условий (безопасности) труда. Мероприятия по обеспечению безопасности практически не затрагивают основной производственный процесс, т.е. незначительно снижают его эффективность. Условные расходы состоят из разовых расходов (R_4) и расходов, связанных с проведением мероприятий –

(r_4) за единицу времени проведения работ, при этом сохраняется некоторый условный доход за единицу времени выполнения работы – D_4.

5. Предаварийное состояние – система может попасть в аварию в любой момент. Принятие решения о проведении комплекса мероприятий по значительному улучшению условий труда принимает ЛПР. Условный доход за единицу времени работы – D_5.

6. Состояние значительного (превентивного) улучшения условий (безопасности) труда. Мероприятия по обеспечению безопасности частично затрагивают основной производственный процесс, т.е. снижают его эффективность (условный доход за единицу времени выполнения работы – D_6). Расходная часть включает как разовые (единовременные) расходы (R_6), так и текущие расходы, связанные с проведением комплекса мероприятий – r_6 за единицу времени.

7. Состояние – авария (чрезвычайное происшествие и др.). Рабочий процесс временно прекращается. Реализуется ликвидация последствий. Расходная часть включает как разовые (единовременные) расходы, в том числе и различные штрафы (R_7), так и текущие расходы, связанные с проведением комплекса мероприятий и восстановительных работ – r_7 за единицу времени.

Очевидно, что выполняется следующий комплекс соотношений:

$$D_1 \geq D_2 \geq D_3 \geq D_4 \geq D_5 \geq D_6,\ R_4 \leq R_6 \leq R_7,\ r_4 \leq r_6 \leq r_7.$$

Таким образом, можно ввести в рассмотрение средний доход за пребывание объекта в каждом конкретном состоянии:

$$\overline{D}_1 = D_1 \cdot m_1,\ \overline{D}_2 = D_2 \cdot m_2,\ \overline{D}_3 = D_3 \cdot m_3,$$
$$\overline{D}_5 = D_5 \cdot m_5,\ \ \overline{D}_6 = (D_6 - r_6) \cdot m_6 - R_6,$$
$$\overline{D}_4 = (D_4 - r_4) \cdot m_4 - R_4,$$
$$\overline{D}_7 = -(R_7 + r_7 \cdot m_7) \qquad (1)$$

где, m_i – значения средних времен пребывания в каждом из состояний, вычисление вектора значений приведено в статье О. В. Горбунова, Г. Е. Нам, П. И. Падерно // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 8(284). – С. 17-26. – EDN: JFPSIQ.

Вычисление значения критерия качества управления. Выбирая в качестве критерия для управления безопасностью труда на строящемся объекте значение среднего дохода, получаем следующее выражение:

$$\overline{D} = \sum_{i=1}^{7} \pi_i m_i \overline{D}_i \Big/ \sum_{i=1}^{7} \pi_i m_i \qquad (2)$$

где, π_i – значения стационарных вероятностей для вложенной марковской цепи [10].

В статье О. В. Горбунова, Г. Е. Нам, П. И. Падерно // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 8(284). – С. 17-26. – EDN JFPSIQ показано, что значения предельных вероятностей для вложенной марковской цепи, т.е. все π_i, (i = 1, 2, …, 7), а также средние времена пребывания объекта в состояниях 3 и 5 – m_3 и m_5 в значительной степени зависят от принятых значений вероятностей, т.е. коэффициентов K_3 и K_5, регламентирующих управление безопасностью объекта.

Таким образом, значение среднего дохода можно представить в виде следующей дроби

$$\overline{D}(K_3, K_5) = \frac{\overline{H}(K_3, K_5)}{\overline{G}(K_3, K_5)}, \qquad (3)$$

числитель которой имеет вид:

$$\overline{H}(K_3, K_5) = \frac{(1-K_3)\cdot(1-K_5)}{\lambda_{12}}\overline{D}_1 + \frac{\overline{D}_2}{\lambda_{23}} + \frac{2(1-K_3)\overline{D}_3}{\lambda_{35}} + \frac{K_3\overline{D}_4}{\lambda_{42}} +$$
$$+ \frac{(1-K_3)}{\lambda_{57}}\left((1-K_5)^2 - K_5^2\ln(K_5)\right)\overline{D}_5 + \frac{(1-K_3)\cdot K_5\overline{D}_6}{\lambda_{62}} + \frac{(1-K_3)\cdot(1-K_5)\overline{D}_7}{\lambda_{71}} \qquad (4)$$

а знаменатель имеет вид:

$$\overline{G}(K_3, K_5) = \frac{(1-K_3)\cdot(1-K_5)}{\lambda_{12}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \frac{2(1-K_3)}{\lambda_{35}} + \frac{K_3}{\lambda_{42}} +$$
$$+ \frac{(1-K_3)}{\lambda_{57}}\left((1-K_5)^2 - K_5^2\ln(K_5)\right) + \frac{(1-K_3)\cdot K_5}{\lambda_{62}} + \frac{(1-K_3)\cdot(1-K_5)}{\lambda_{71}} \qquad (5)$$

Оптимизация управления. Даже поверхностный анализ выражений (4) и (5) показывает, что получение аналитического выражения в общем виде для нахождения значений, максимизирующих средний доход, не является целесообразным. Задача оптимального управления должна решаться для каждого конкретного случая в отдельности в зависимости от значений конкретных характеристик реального объекта.

Пример. Рассмотрим часто встречающийся в практике случай, когда аварийное состояние недопустимо, т.к. убытки катастрофически велики. Отсюда следует, что при наступлении состояния 5 (предаварийного состояния) следует немедленно приступить к комплексу восстановительных мероприятий. Будем предполагать, что в рассматриваемом случае при проведении комплекса работ по улучшению характеристик безопасности реализуется полное восстановление, т.е. переход в состояние 1. В этом случае управление процессом обеспечения безопасности объекта зависит от стратегии принятия решения о возможном превентивном проведении работ по улучшению характеристик безопасности при попадании объекта в состояние 3. Однако в этом случае в состоянии 4 реализуется только некоторый усеченный комплекс работ, обеспечивающий объекту только переход в состояние 2 (рис. 2).

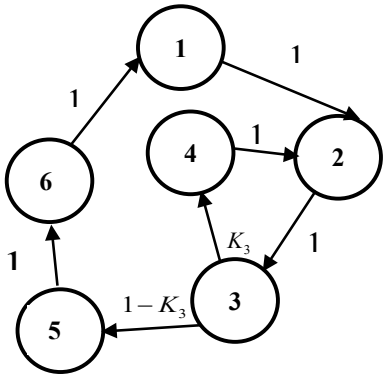


Рисунок 2 – Граф объекта с запрещенными авариями и вероятности переходов

Замечание. Стратегия управления в нашем случае заключается в некотором выборе между ранним, но неполным восстановлением, и более поздним, но полным восстановлением всех характеристик безопасности объекта.

Составим и решим систему уравнений для определения предельных состояний для вложенной цепи Маркова, в виде:

$$\begin{cases} \pi_1 = \pi_6 \\ \pi_2 = \pi_1 + \pi_4 \\ \pi_3 = \pi_2 = \pi_1 + \pi_4 \\ \pi_4 = \pi_3 \cdot K_3 \\ \pi_5 = \pi_3 \cdot (1 - K_3) \\ \pi_6 = \pi_5 \\ \sum_{i=1}^{6} \pi_i = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} \pi_1 = \dfrac{1\text{-}K_3}{5\text{-}2K_3}, \quad \pi_2 = \dfrac{1}{5\text{-}2K_3}, \\ \pi_3 = \dfrac{1}{5\text{-}2K_3}, \quad \pi_4 = \dfrac{K_3}{5\text{-}2K_3}, \\ \pi_5 = \dfrac{1\text{-}K_3}{5\text{-}2K_3}, \quad \pi_6 == \dfrac{1\text{-}K_3}{5\text{-}2K_3} \end{cases} \tag{6}$$

Полагая известными средние времена пребывания системы ЧМС в соответствующих состояниях и средние доходы за пребывание в этих состояниях подставляя в (3) получаем средний доход для состояния 3:

$$\overline{D}(K_3) = \frac{(1\text{-}K_3)m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + K_3m_4\overline{D}_4 + (1\text{-}K_3)m_5\overline{D}_5 + (1\text{-}K_3)m_6\overline{D}_6}{(1\text{-}K_3)m_1 + m_2 + m_3 + K_3m_4 + (1\text{-}K_3)m_5 + (1\text{-}K_3)m_6} =$$

$$= \frac{m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6 - K_3(m_1\overline{D}_1 - m_4\overline{D}_4 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6)}{m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_6 - K_3(m_1 - m_4 + m_5 + m_6)} \tag{7}$$

Не умаляя общности рассуждений будем полагать, что выражения $m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6$; $m_1\overline{D}_1 - m_4\overline{D}_4 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6$ и $m_1 - m_4 + m_5 + m_6$ положительны, т.е. выполняются соотношения: $m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6 > 0$; $m_1\overline{D}_1 - m_4\overline{D}_4 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6 > 0$ и $m_1 - m_4 + m_5 + m_6 > 0$.

Принимая во внимания монотонность функции $\overline{D}(K_3)$ в зависимости от значений входящих в нее переменных можем получить следующие условия для назначения K_3:

$$K_3 = \begin{cases} 1, \text{ если } \left(m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6\right)\cdot(m_1 - m_4 + m_5 + m_6) - \\ \quad -(m_1\overline{D}_1 - m_4\overline{D}_4 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6)(m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_6) > 0 \\ 0, \text{ если } \left(m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6\right)\cdot(m_1 - m_4 + m_5 + m_6) - \\ \quad -(m_1\overline{D}_1 - m_4\overline{D}_4 + m_5\overline{D}_5 + m_6\overline{D}_6)(m_1 + m_2 + m_3 + m_5 + m_6) < 0 \end{cases} \tag{8}$$

Замечание 1. Равенство K_3=0 означает, что наиболее эффективным является параллельное (при возможности) проведение комплекса восстановительных мероприятий сразу после попадания объекта в предаварийное состояние. Термин «сразу» следует трактовать так, чтобы в течение промежутка времени между попаданием объекта в предаварийное состояние и началом восстановительных мероприятий вероятность аварии (перехода в отсутствующее (запрещенное состояние)) равнялась нулю. Это должно быть отражено в соответствующей документации, в том числе в должностных инструкциях. Таким образом, в случае K_3=0 можно полагать, что выполняется соотношение m_5=0, т.е. состояние становится практически виртуальным, что отражено на рисунке *3а*).

Замечание 2. Равенство K_3=1 означает, что при наступлении состояния 3 (переходного состояния) следует практически немедленно приступить к комплексу восстановительных мероприятий, т.е. продолжение строительства объекта в граничных, с точки зрения безопасности труда, условиях является экономически нецелесообразным. Это должно быть отражено в соответствующей документации, в том числе в инструкциях. Таким образом, в случае K_3=1 объект практически может находиться только в двух состояниях (2 и 4) в то время как состояние 1 (источник) и состояние 3 практически на эффективность его функционирования влияния не оказывают. В этом случае можно практически полагать, что выполняется соотношение m_3=0, т.е. состояния 1 и 3 становится практически виртуальными, что отражено на рисунке *3б*).

Исходя из приведенных рассуждений можно получить выражения для оценки значения критерия эффективности управления безопасностью строящегося объекта:

– для случая отсутствия управления в состоянии 3 (K_3=0, m_5=0) получаем:

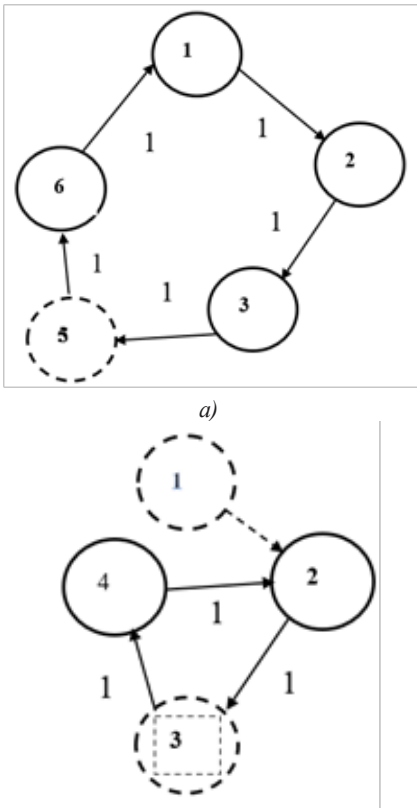
$$\overline{D}(0) = \frac{m_1\overline{D}_1 + m_2\overline{D}_2 + m_3\overline{D}_3 + m_6\overline{D}_6}{m_1 + m_2 + m_3 + m_6} \tag{9}$$

– для случая необходимости немедленного начала устранения рисков безопасности в состоянии 3 (K_3=1, m_3=0) получаем:

$$\overline{D}(1) = \frac{m_2\overline{D}_2 + m_4\overline{D}_4}{m_2 + m_4} \tag{10}$$

Из изложенного видно, что для нужд практики достаточно сравнить значения $\overline{D}(0)$ и $\overline{D}(1)$, и на основании результатов сравнения определить

некоторую стратегию управления безопасностью труда на конкретном строительном объекте.



а)

б)

Рисунок 3 – Граф состояний объекта с запрещенными авариями и вероятностями переходов: а) для случая отсутствия управления в состоянии 3; б) для случая немедленного начала устранения рисков в состоянии 3

Результаты. В качестве объекта для проведения натурных исследований была выбрана строительная площадка объекта жилого строительства ЖК «Пулковский дом», генеральный застройщик ГК «Эталон», в г. Санкт-Петербурге.

В деятельность генеральной подрядной организации ООО «Новатор» для ГК «Эталон» по мониторингу выполнения требований охраны труда, в локальные нормативные акты были внедрены критерии по контролю «Персонала» и «СИЗ», приведены в статье Г.Е. Нам // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 1(61). – С. 90-97. – EDN: DNEPBX.

На основе действующего соглашения о сотрудничестве между ФГБОУ ВО СПбГАСУ и компании ООО «Визорлабс» №194 от 25.11.2024 г., в целях организации совместных научных исследований были предоставлены смарт-видеокамеры. Для организации видеонаблюдения за выделенным участком строительной площадки ЖК были использованы две смарт-видеокамеры с помощью которых проводилась видео фиксация нарушений по вышеназванным критериям (рис. 4).

Для сравнения результатов мониторинга были проведены два обследования на выбранном участке: первое обследование на предмет нарушений критериев «Персонал» и «СИЗ» проводилось на основе стандартного обхода и осмотра площадки специалистом по охране труда (СОТ) и ответственным ИТР; второе обследование проводилось в течении одной рабочей смены с помощью смарт-видеокамер, снабженных технологией «машинного зрения», передающих сигнал о выявленных нарушениях в цифровую модель (ЦИМ) объекта строительства на ПК и носимые устройства (планшеты и смартфоны), с помощью ПО, разработанного в компании «Эталон».

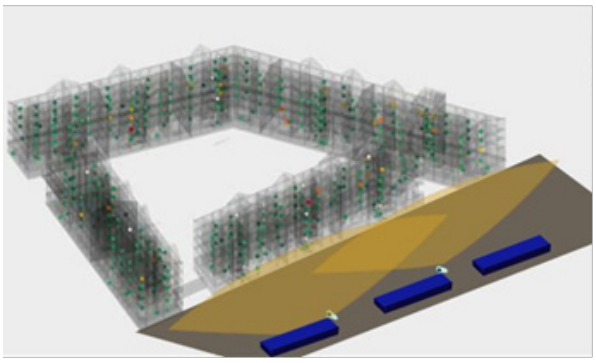


Рисунок 4 – Схема размещения смарт-видеокамер на участке строительной площадки ЖК «Пулковский дом»

Результаты проведения мониторинга показали, что при личном обходе и осмотре рабочих мест на строительной площадке в течение полутора часов, были выявлены нарушения по вышеупомянутым критериям в количестве четырех. Так как обход и осмотр специалистами по охране труда осуществляется согласно графику и носит периодический характер, то количество нарушений, которое «попалось на глаза» СОТу, не отражает всей динамично меняющейся картины происходящих нарушений в течении рабочей смены.

За время применения смарт-видеокамер, в течении рабочей смены, на поднадзорном участке было выявлено 43 нарушения по критерию «СИЗ», пример регистрации нарушений показан на рисунке 5.

Рисунок 5 – Пример регистрации нарушений по критерию «СИЗ» смарт-видеокамерой на участке строительной площадки ЖК «Пулковский дом»

Подводя итог, по полученным результатам мониторинга, можно сказать, что своевременное

выявление нарушений по критериям «СИЗ» и «Персонал» позволило оперативно, в течении 1 минуты, принять меры по устранению несоответствий. Таким образом, основываясь на подходе, указанном на рисунке 3*б* – «немедленное реагирование» позволило предотвратить потенциальные ЧП, которые могли бы случиться с работниками в случае продолжения нарушений требований ОТ.

Основываясь на данных статистики производственного травматизма в строительной отрасли за 2023 г. и первое полугодие 2024 г., приведенных Роструд для города Санкт-Петербурга количество погибших работников на строительных площадках составило 47 и 73 человека в соответствующие периоды [11]. При коэффициенте травматизма равном 0,053 для данных периодов и количестве людей, трудящихся на строительных площадках г. Санкт-Петербурга, можно определить риск травматизма равный $5{,}2 \cdot 10^{-4}$ в 2023 г. и $1{,}12 \cdot 10^{-3}$ в 2024 г., что входит в область высокой степени риска травмирования и говорит о том, что несчастные случаи в 2024 г. происходили в два раза чаще чем в 2023 г.

Указанные уровни риска учитывались при обосновании затрат на мероприятие по применению предлагаемой системы информационной поддержки принятия решений. При составлении сметы затрат на поставку и обслуживание оборудования были учтены следующие статьи расходов: 1) оборудование – стоимость составила около 185 тыс. руб., 2) монтажные работы – стоимость около 38 тыс. руб., 3) дополнительные расходы (резерв 15% от стоимости оборудования) – составил около 34 тыс. руб., 4) программное обеспечение – 90 тыс. руб./год. Итого, общая стоимость, включая НДС 10 и 20% и накладные расходы составила около 350 тыс. руб./год при использовании СИП. В смету затрат не вошла стоимость уже имеющегося программного обеспечения – плагина, разработанного в ГК «Эталон» для передачи информации в ЦИМ, и оборудования – ПК и планшетов, которые имелись у компании застройщика.

Для сравнения затрат на внедрение СИП была проведена оценка предотвращенного ущерба гибели работника на строительной площадке [12]. В качестве исходной информации были использованы данные о травматизме с описанием типичных причин смертельного травматизма на строительных площадках страны. Был рассмотрен случай с наибольшим ущербом, который повлек за собой остановку деятельности строительной организации на участке строительства. Несчастный случай связан с обрывом строп и падением груза на работника, находящегося в опасной зоне падения грузов. Работник получил травмы несовместимые с жизнью до приезда скорой помощи. После происшествия работы на строительной площадке были остановлены до прибытия представителей контрольно-надзорных органов.

На основании данных Единой информационной системы жилищного строительства (ЕИСЖС) средняя стоимость производства работ по строительству 1 м^2 жилой застройки по Северо-Западному федеральному округу для г. Санкт-Петербурга составляла 90,8 тыс. руб. в 2023 г., 94,3 тыс. руб. в 2024 г. и 97,9 тыс. руб. на начало 2025 года [13]. Таким образом, недовыпуск продукции в объеме 500 м^2 в течении 1,5 смен (12 часов) простоя участка строительства будет равен около 53 млн. руб. Оценка потерь от предполагаемого несчастного случая, представлена в таблице 1.

Как видно из таблицы, наиболее крупные потери для строительной компании будут представлять простои производства и недовыпуск продукции, связанные с организацией расследования несчастного случая со смертельным исходом. Однако следует обратить внимание на тот факт, что итоговая оценка суммы потерь и затрат может превышать первоначальную оценку в десятки раз, так как на начальном этапе трудно оценить имиджевые и другие виды потерь в отдаленной перспективе деятельности компании.

В завершении, приведём расчет полной окупаемости проекта внедрения СИП по двум критериям «Персонал» и «СИЗ», с учётом использования заимствованных средств и дисконтирования (по максимальной величине действующего тарифа коэффициента дисконтирования на период 2025 г.).

Стоимость оборудования, его монтажа и пусконаладочных работ, программного обеспечения и обучения персонала, а также обслуживания, согласно полной сметной стоимости, составляет около 350 тыс. руб.

Инвестиции составляют 350 000 руб.

Прогнозируемые денежные потоки (*CF*):

• первый год: 150 000 руб. (наблюдается снижение затрат на штрафы и расследования несчастных случаев, экономия времени на оформлении локальных документов);

• второй год 100 000 руб. (дальнейшее снижение инцидентов, более эффективное управление рисками, более эффективное обучение по применению СИЗ и др.);

• третий год 100 000 руб. (стабилизация показателей, меньший потенциал для роста).

Ставка дисконтирования (*r*) – 21% (на основе ставки рефинансирования ЦБ РФ на момент декабрь-январь 2024-2025 гг. [15, 16].

Расчет дисконтированных денежных потоков (*DCF*) (табл. 2), по формуле:

$$DCF = \frac{CF}{(1+r)^n}, \quad (11)$$

где: *CF* – денежный поток в *n* году, руб.; *r* – ставка дисконтирования; *n* – номер года.

Расчет накопленных дисконтированных денежных потоков *DPBP:* для определения *DPBP* необходимо оценить, когда накопленные *DCF* превысят первоначальные инвестиции (табл. 3).

Таблица 1 – Оценка предотвращенного ущерба от несчастного случая на строительной площадке

№ п/п	Статьи расходов и потерь	Время, час	Стоимость, руб./ час	Итого, руб.
1. Первоочередные затраты и потери				
1	Зарплата пострадавшего в день несчастного случая	4	690	2 760
2	Оплата вынужденного простоя работникам участка (8 чел.)	12	690	66 240
3	Оплата вынужденного простоя руководителям участка (2 чел.)	12	1 130	27 120
2. Затраты и потери, связанные с нарушением производственного процесса				
4	Зарплата работников, отвлеченных от работы на восстановление безопасности на месте происшествия (3 чел.)	16	690	33 120
3. Ущерб, нанесенный предприятию				
5	Упущенная прибыль предприятия	12	6 250 000	50 000 000
6	Ущерб вследствие поломки оборудования, инструментов и пр. (строп канатный четырехветвевой 4СК 12.5т/6.0м)	-	-	38 000
7	Ущерб вследствие разрушения, порчи используемых материалов, сырья, полуфабрикатов и пр. (балка двутавровая 12 м, 1 шт.)	-	-	122 000
4. Затраты на проведение расследования НС				
8	Оплата работы членов комиссии организации, где произошел НС (3 чел.)	120	720	259 200
9	Оплата работы сторонних членов комиссии (4 чел.)	120	1 120	537 600
10	Оплата работы экспертов и проведения экспертиз (2 чел.)	120	1 200	288 000
11	Расходы на проведение экспертизы	-	-	60 000
5. Затраты на реализацию решений комиссии по расследованию				
12	Затраты на проведение внепланового инструктажа работников	-	-	3 000
13	Стоимость работ по устранению последствий НС (работа крана, экскаватора)	16	7 500 – кран 5 000 – экскаватор	195 000
14	Затраты на судебные издержки и услуги юристов	-	-	400 000
6. Штрафы, компенсации и проч. расходы				
15	Штраф ГИТ	-	-	400 000
16	Штраф Ростехнадзора	-	-	300 000
17	Единоразовая компенсация семье погибшего на погребение	-	-	8 370,20
18	Пособия по потере кормильца на одного ребенка с учетом ИПК на момент смерти	-	-	8 134 + 50% от ИПК
19	Компенсация морального ущерба	-	-	250 000
Подлежит вычитанию				
20	Единовременная страховая выплата [14]	-	-	2 000 000
	ИТОГО:	-	-	52 988 544,2

Таблица 2 – Оценка дисконтированных денежных потоков DCF

Год (n)	Денежный поток (CF), руб.	Дисконтный множитель $\frac{1}{(1+r)^n}$	Дисконтированный CF (DCF), руб.
1	150 000	$1/(1+0,21)^1 = 0,826$	150 000*0,826 = 123 900
2	150 000	$1/(1+0,21)^2 = 0,683$	150 000*0,683 = 102 450
3	100 000	$1/(1+0,21)^3 = 0,564$	100 000*0,564 = 56 400
4	100 000	$1/(1+0,21)^4 = 0,467$	100 000*0,467 = 46 700
5	55 000	$1/(1+0,21)^5 = 0,385$	55 000*0,385 = 21 204
ИТОГО:	555 000		

Таблица 3 – Оценка накопленных дисконтированных денежных потоков DPBP

Год (*n*)	Дисконтированный *CF* (*DCF*), руб.	Накопленный *DCF*, руб.
0	-350 000 (первоначальные инвестиции)	-350 000
1	123 900	-350 000+123 900 = -226 100
2	102 450	-226 100 + 102 450 = - 123 650
3	56 400	-123 650 + 56 400 = - 67 250
4	46 700	-67250 +46 700 = -20 550
5	21 204	-20 550 + 21 204 = + 654

Из таблицы 3 видно, что:

• к концу 4 года накопленные дисконтированные потоки всё еще отрицательны и составляют – 20 550 руб.

• к концу 5 года дисконтированные потоки положительны и составляют + 654 руб.

Это означает, что дисконтированная окупаемость происходит в период окончания 5 года.

– Определение интерполяцией точного расчета *DPBP*.

Для более точного определения срока окупаемости используем формулу интерполяции:

$$DPBP = n1 + \left(\frac{|NDCF1|}{DCF3}\right), \quad (12)$$

где, *n*1 – значение года до окупаемости = 4 год;

*NDCF*1 – накопленный *DCF* до окупаемости = -20 550 руб. (берем по модулю);

*DCF*3 в год окупаемости дисконтированный *CF*(*DCF*) показатель = 21 204 руб.

DPBP = 4 + (|20550| / 21204) = 4,97 года (4 года 10 месяцев)

Следует отметить, что в отношении привлеченных средств направленных на меры по улучшение условий труда и охрану труда (п. 33 Приказа Минтруд РФ № 771н [17]), государственное регулирование позволяет применять пониженную ставку коэффициента дисконтирования, которая составляет 3% в 2025 году [18]. Исходя из этого, при расчете полной окупаемости проекта внедрения СИП получим срок окупаемости проекта равный 1,83 года (1 год 9 месяцев).

Срок окупаемости приведен без учета выгод связанных с предотвращением ущербов, в том числе от несчастных случаев на производстве.

Обсуждение. При обсуждении внедрения каких-либо инноваций, в любом направлении деятельности человека, всегда встает вопрос о экономической или иной целесообразности предстоящих затрат. Если рассматривать производственную деятельность, в частности строительство, то как правило многие руководствуются приоритетностью финансовых затрат и периодом их окупаемости. Не секрет, что финансирование, направленное на обеспечение безопасности труда длительное время осуществлялось по остаточному принципу. Затраты на охрану труда, выделяемые в компаниях, как правило не превышали ту пороговую величину, которая закреплена в Российском законодательстве и включена в сумму затрат на производство продукции (работ, услуг) в размере не менее 0,2% (ч. 3 ст. 214 ТК РФ) для всех работодателей. От выполнения данной обязанности освобождены государственные унитарные предприятия и федеральные учреждения. Финансирование мероприятий по улучшению условий и охраны труда в бюджетных организациях осуществляется за счет средств, выделяемых на их содержание [19].

Тем не менее, требования современных реалий показывают необходимость изменения подобного рода подходов и заставляют задуматься руководителей компаний о большем (значительном) выделении средств на нужды безопасности труда и в том числе на цифровую трансформацию своего бизнеса [20, 21].

Предложенные нами меры по совершенствованию системы контроля за обеспечением требований безопасности труда по показателям «СИЗ» и «Персонал» позволят существенно сократить время реагирования на происшествия. При этом превентивные меры реагирования на нарушения позволят сократить количество потенциальных угроз, которые могут привести к производственным травмам, в том числе с летальным исходом.

Выводы. Дано описание функционирования системы ЧМС для организации цифровой системы контроля безопасности труда в строительной отрасли, для которой были установлены так называемые состояния, изображенные в виде графов на рисунке 1. Особо выделены: переходное – состояние 3 и предаварийное – состояние 4, в которых авторами предлагается осуществлять меры управления, способные предотвратить дальнейшее развитие негативного события в ЧМС. Для этого введено понятие коэффициента опережающего предотвращения рисков – $K_{опр}$, который численно равен значениям вероятностей p_{34} и p_{56}.

Для оценки экономических показателей характеризующих эффективность управления ЧМС показаны состояния объекта строительства с запрещенными авариями и вероятностями переходов, для случая отсутствия управления и немедленного начала устранения рисков в переходном состоянии – 3 (рис. 3). В этой связи введена математическая модель оценки среднего дохода позволяющая определить стратегию управления безопасностью труда на конкретном строительном объекте.

Применение подходов, основанных на предлагаемой модели цифровой системы контроля безопасности труда, реализовано в проведённых натурных испытаниях на участке строительной площадки ЖК «Пулковский дом». Представлены результаты регистрации нарушений по критериям «СИЗ» и «Персонал» с помощью видеофиксации нарушений смарт-видеокамерой на выделенном участке строительной площадки.

Дана оценка экономической эффективности мероприятий по установке цифровой системы видеоконтроля, которая показала, что:

– Дисконтированный срок полной окупаемости при использовании заимствованных средств, с действующей ставкой рефинансирования в 21% равен 4 года 10 месяцев, что является приемлемым сроком окупаемости. При ставке рефинансирования равной 3% срок окупаемости составит 1 год и 9 месяцев. Расчет срока окупаемости приведен без учета выгод связанных с предотвращением ущербов, в том числе от несчастных случаев на производстве.

– При сравнении суммы предотвращенного ущерба от производственной травмы со смертельным исходом для одного работника с суммой затрат на внедрение цифровой системы контроля, с применением смарт-видеокамер и передачей данных в ЦД, становится очевидной экономическая эффективность применения данной системы.

– Показана способность цифровой системы контроля, осуществляющей работу на основе алгоритмов, построенных по математической модели, предупреждать ЛПР о трансформации системы в переходное состояние, на основе вычисления коэффициента опережающего предотвращения рисков – $К_{опр}$.

Проведенный авторами анализ даёт понимание экономической целесообразности инвестиций в обеспечение безопасности труда и может послужить основой для принятия решений по финансированию мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ 12.0.230.3-2016 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Оценка результативности и эффективности. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294354/ (дата обращения: 29.04.2025).

2. ГОСТ Р ИСО 45001-2020 Национальный стандарт РФ. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200175068 (дата обращения: 29.04.2025).

3. Федеральный закон РФ от 28.12.2013 г. № 426-ФЗ О специальной оценке условий труда (с изменениями на 24 июля 2023 года) (редакция, действующая с 1 сентября 2023 года) URL: https://docs.cntd.ru/document/499067392 (дата обращения: 29.04.2025).

4. Федеральный закон РФ от 24.07.1998 г. №125-ФЗ Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний (с изменениями на 29 мая 2024 года). URL: https://docs.cntd.ru/document/901713539?section=text (дата обращения: 29.04.2025).

5. Федеральный закон РФ от 27.07.2010 г. № 225-ФЗ Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте (с изменениями на 29 декабря 2022 года) (редакция, действующая с 15 июля 2023 года). URL: https://docs.cntd.ru/document/902228214?section=-text (дата обращения: 29.04.2025).

6. Стратегия «Агрессивное развитие инфраструктуры» URL: https://ancb.ru/files/ck/1618305869_Husnullin_i_Plan_Mishustina.pdf (дата обращения: 29.04.2025).

7. Поручение Президента РФ от 19.07.2018 № ПР-1235 О первоочередных задачах по модернизации строительной отрасли и повышению качества строительства URL: https://docs.cntd.ru/document/550966183 (дата обращения: 29.04.2025).

8. Постановление Правительства от 05.03.2021 РФ № 331 (с изменениями от 20.12.2022 постановлением Правительства Российской Федерации от 20 декабря 2022 года №2357 (вступило в силу с 1 сентября 2023 года)). URL: https://docs.cntd.ru/document/573842519 (дата обращения: 29.04.2025).

9. ВНИИ Труда Минтруда России Охрана труда в цифрах 2024 г. URL: https://vcot.info/uploads/landings_files/66d99c1a-16c0e568797996.pdf (дата обращения: 30.04.2025).

10. Бурков Е.А. Качество информационных систем / П.И. Падерно, Е.А. Бурков, Н.А. Назаренко // Учебник. Издательство «Академия», 2015, 224 с.

11. Государственная инспекция труда в г. Санкт-Петербурге. Оперативные данные о несчастных случаях. URL: https://git78.rostrud.gov.ru/osnov/operativnye_dannye/2024_god/ (дата обращения: 30.04.2025).

12. Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификации и учета чрезвычайных ситуаций URL: https://docs.cntd.ru/document/560438170?section=text (дата обращения: 30.04.2025).

13. Единая информационная система жилищного строительства. URL: https://xn--80az8a.xn--d1aqf.xn--p1ai/медиа/новости/2025/01/стоимость-строительства-1-кв.-метра-общей-площади-в-каждом-регионе-в-январе-2025-года (дата обращения: 30.04.2025).

14 Федеральный закон от 03.04.2023 № 98-ФЗ О внесении изменений в статью 11 Федерального закона «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний» и статьи 14 и 16 Федерального закона «Об обязательном социальном страховании на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством». URL: https://docs.cntd.ru/document/1301167898?section=text (дата обращения: 01.05.2025).

15. Процентные ставки по операциям Банка-России от 25.04.2025 г. URL: https://www.cbr.ru/oper_br/iro/#a_35860file (дата обращения: 01.05.2025).

16. Воронов Д.С. и др. Расчет ставки дисконтирования для российского рынка в современных условиях // Финансы и кредит. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 795-839.

17. Приказ Минтруд РФ от 29 октября 2021 года № 771н Об утверждении Примерного перечня ежегодно реализуемых работодателем мероприятий по улучшению условий и охраны труда, ликвидации или снижению уровней профессиональных рисков либо недопущению повышения их уровней URL: https://docs.cntd.ru/document/727092795?section=status (дата обращения: 01.05.2025).

18. Приказ Минтруд РФ от 11.07.2024 года № 347н Об утверждении Правил финансового обеспечения предупредительных мер по сокращению производственного травматизма и профессиональных заболеваний работников и санаторно-курортного лечения работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными производственными факторами. URL: https://docs.cntd.ru/document/1310208008 (дата обращения: 01.05.2025).

19. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ от URL: https://docs.cntd.ru/document/901807664 (дата обращения: 01.05.2025).

20. Постановление Правительства РФ от 02.03.2019 № 234 О системе управления реализацией национальной программы "Цифровая экономика Российской Федерации" (с изменениями на 1 августа 2024 года) URL: https://docs.cntd.ru/document/553834855?section=text (дата обращения: 01.05.2025).

21. Рыжко, А.Л. Реализация концепции «Индустрия 4.0» как основы развития отечественных высокотехнологичных промышленных предприятий / А.Л. Рыжко, П.Е. Сварник // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 9. – С. 10-15. – EDN WSKETI.

Статья поступила в редакцию 02.05.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 658.511.3
EDN: HXOSRG

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ СОТРУДНИКОВ ДЛЯ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ РАБОТ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 4305-2071
Author ID: 967593
ORCID: 0000-0003-3771-6590
Researcher ID: AKK-7102-2021
Scopus ID: 57200275629

БОРИСОВА Анастасия Викторовна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Ростовский государственный университет путей сообщения
(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: nastja004@bk.ru)

SPIN: 7772-2802
Author ID: 1095601
ORCID: 0000-0003-2727-7221

БАЛАНОВА Марина Васильевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Ростовский государственный университет путей сообщения
(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: fmv04@mail.ru)

SPIN: 3202-2790
Author ID: 1108039
ORCID: 0000-0002-9386-905X
Researcher ID: AAK-9232-2021

КОЗЛЮК Виталий Викторович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Ростовский государственный университет путей сообщения
(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: kvv_555@mail.ru)

SPIN: 2888-7780
Author ID: 864239
ORCID: 0000-0002-3148-4154
Researcher ID: AAK-9196-2021
Scopus ID: 57194331492

ФИРСОВ Виктор Анатольевич, кандидат военных наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»
Ростовский государственный университет путей сообщения
(344038, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, дом 2, e-mail: vifir1959@rambler.ru)

Аннотация. В статье анализируются методы прогнозирования профессиональной пригодности сотрудников для выполнения опасных и вредных работ. Рассматриваются основные факторы, влияющие на профессиональную готовность работников к деятельности в условиях высокого риска, включая физическое здоровье, когнитивные способности и стрессоустойчивость. В ходе исследования были изучены три профессиональные группы: шахтёры и машинисты подземных работ, операторы химической промышленности и промышленные альпинисты на опасных производствах, общая выборка составила 50 человек. Средний возраст респондентов в выборке составил 36 лет (от 25 до 50 лет), стаж работы – от 2 до 20 лет. Для оценки профессиональной пригодности применялось анкетирование, психофизиологическое тестирование в стандартных условиях и с симуляцией стрессовых ситуаций параллельно с оценкой пульса, давления, уровня сатурации. Демонстрируется, что такие параметры, как время реакции, устойчивость и переключаемость внимания в совокупности со стрессоустойчивостью, которые являются ключевыми индикаторами профессиональной пригодности. Описано, что сотрудники с повышенным уровнем стресса и хронической усталостью демонстрируют худшие результаты в выполнении задач в стресс-тестах. Выявлена отрицательная корреляция между стажем работы и стрессоустойчивостью, а также положительная корреляция между стажем работы и наличием хронического стресса и усталости. Это означает, что с увеличением продолжительности работы, характеризующейся опасными и вредными условиями труда, возрастает риск эмоционального выгорания, профессионального стресса, возникновения ошибок в работе, травмоопасности. Подчеркивается, что использование стресс-тестов позволяет достоверно

оценивать готовность сотрудников к работе в аварийных или критических ситуациях. На основе проведённого анализа предложены рекомендации для улучшения систем профессионального отбора, включая предварительную подготовку при отборе молодых специалистов на базе стресс-тестов, мониторинг физического состояния действующих сотрудников вместе с регулярными экспертизами профессиональной пригодности и внедрение программ реабилитации или отстранения от опасных работ несоответствующих сотрудников. Практическая значимость исследования заключается в возможности минимизации профессиональных рисков и повышения эффективности трудовой деятельности. Рассмотрены перспективы дальнейших исследований, включая изучение влияния возраста, профессионального стажа и хронического стресса на пригодность сотрудников. В заключение подчеркивается необходимость интеграции современных методик и технологий, включая использование искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения, для повышения точности прогнозирования пригодности сотрудников. Это позволит более эффективно отбирать и подготавливать персонал, обеспечивая безопасность и высокую производительность в условиях опасных производств.

Ключевые слова: профессиональная пригодность, опасные работы, стрессоустойчивость, психофизиологическое тестирование, когнитивные способности, стресс-тест, мониторинг здоровья, безопасность труда.

METHODS OF FORECASTING THE PROFESSIONAL SUITABILITY OF EMPLOYEES FOR DANGEROUS AND HARMFUL WORK

© The Author(s) 2025

BORISOVA Anastasia Viktorovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"
Rostov State Transport University
(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: nastja004@bk.ru)
BALANOVA Marina Vasilyevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"
Rostov State Transport University
(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: fmv04@mail.ru)
KOZLYUK Vitaly Viktorovich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"
Rostov State Transport University
(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: kvv_555@mail.ru)
FIRSOV Viktor Anatolyevich, candidate of military sciences,
associate professor of the Department of "Life Safety"
Rostov State Transport University
(344038, Russia, Rostov-on-Don, Rostov Infantry Regiment Square, house 2, e-mail: vifir1959@rambler.ru)

Abstract. The article analyzes methods for predicting the professional suitability of employees for hazardous and harmful work. The main factors affecting the professional readiness of workers for activities in high-risk conditions are considered, including physical health, cognitive abilities and stress resistance. During the study, three professional groups were studied: miners and underground machinists, chemical industry operators and industrial climbers in hazardous industries, the total sample was 50 people. The average age of respondents in the sample was 36 years (from 25 to 50 years), work experience – from 2 to 20 years. To assess professional suitability, questionnaires, psychophysiological testing were used in standard conditions and with simulation of stressful situations in parallel with the assessment of pulse, pressure, saturation level. It is demonstrated that parameters such as reaction time, stability and attention switchability together with stress resistance are key indicators of professional fitness. Employees with increased levels of stress and chronic fatigue are described as performing worse on tasks in stress tests. A negative correlation between work experience and stress resistance was revealed, as well as a positive correlation between work experience and the presence of chronic stress and fatigue. This means that with an increase in the duration of work characterized by dangerous and harmful working conditions, the risk of emotional burnout, occupational stress, errors in work, and injury risk increases. It is emphasized that the use of stress tests allows you to reliably assess the readiness of employees to work in emergency or critical situations. Based on the analysis, recommendations were proposed to improve the professional selection systems, including preliminary training in the selection of young specialists based on stress tests, monitoring the physical condition of existing employees along with regular examinations of professional suitability and the introduction of rehabilitation programs or suspension of inappropriate employees from hazardous work. The practical significance of the study lies in the possibility of minimizing occupational risks and increasing labor efficiency. Prospects for further research are considered, including the study of the influence of age, professional experience and chronic stress on the suitability of employees. In conclusion, the need to integrate modern techniques and technologies, including the use of artificial intelligence (AI) and machine learning, to improve the accuracy of predicting the suitability of employees. This will allow more efficient selection and training of personnel, ensuring safety and high productivity in hazardous production conditions.

Для цитирования: *Борисова А.В. Методы прогнозирования профессиональной пригодности сотрудников для опасных и вредных работ / А.В. Борисова, М.В. Баланова, В.В. Козлюк, В.А. Фирсов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 213-219. – EDN: HXOSRG.*

Введение. Опасные и вредные условия труда разнообразны и включают в себя различные категории. Так, в анализе Abikenova S. et al. (2023) было выявлено 134 вредных и/или опасных фактора, разделенных на 6 основных групп, оказывающих влияние на здоровье человека, а именно: физическое, химическое, биологическое, механическое, психофизиологическое и общее промышленное влияние [1].

Прогнозирование профессиональной пригодности сотрудников для выполнения опасных и вредных работ является одной из важнейших задач в области охраны труда и производственной безопасности. Профессиональная пригодность специалистов экстремального профиля включает силовую, физическую подготовку к выполнению поставленных задач, безупречное соматическое здоровье, наличие системы профессиональных знаний, умений и навыков, психологическую устойчивость, способность к командной работе, высокую мотивационную составляющую, требующие развития в процессе обучения [2]. Исследование Дубинского А.А. и др. (2021) показало, что с увеличением стажа профессиональной деятельности отмечается преобладание внешнеобвиняющих стратегий реагирования и низкий самоконтроль [3]. Ключевой причиной таких аварий как: нарушение регламентов, инструкций и правил безопасности, неисполнение обязанностей, недостаточное знание требований безопасности, слабая дисциплина и недостаточный контроль, становится человеческий фактор. Для предотвращения данных опасных событий необходимо: формировать культуру безопасности, внедрять эффективный отбор персонала и улучшать поведенческий аудит на опасных объектах [4].

В современных условиях требования к квалификации и психологической устойчивости работников возрастают, разработка и внедрение эффективных методов оценки пригодности становятся критически важными. Экспертиза профессиональной пригодности всегда была сложным процессом, а в настоящее время наблюдается тенденция к упрощению предварительных и периодических медицинских осмотров, что исключает важные функциональные и лабораторные исследования, и может привести к возвращению на работу ранее отстранённых сотрудников, а также к увеличению смертности на рабочих местах [5].

Медицинские обследования в современных подходах зачастую фокусируются только на физическом состоянии работников, игнорируя их психофизиологические способности – стрессоустойчивость, скорость реакции и когнитивная гибкость. Психологические тесты не всегда адаптированы под специфические требования опасных профессий и не учитывают реальные рабочие условия. В большинстве случаев отсутствует интегрированный подход, позволяющий предсказывать успешность выполнения задач на основе комплексных показателей.

Ретроспективную психодиагностику должна заменить диагностика проективная, ориентированная на новые модели поведения и деятельности, новые требования к персоналу [6]. Научные исследования в данной области подтверждают необходимость создания новых, более точных и надежных инструментов оценки, например использование автоматизированных систем тестирования, машинного обучения и биометрических датчиков [7]. Исследование Забержинского Б.Э. и др. (2023) на примере анализа 15 000 резюме соискателей и восьми вакансий показало эффективность до 95% для классификации резюме и отбора персонала по четырём различным кластерам на базе ИИ и машинного обучения [8]. В работе Бухтиярова И.В. и др. (2019) описано применение компьютерной программы, обеспечивающей возможность проведения полуавтоматического анализа вызванных потенциалов мозга при предъявлении слайдов наркотической тематики. Данная программа показала свою эффективность при определении социально-психологической надежности лиц, связанных с опасными профессиями. Прогностические цифровые нейросетевые модели являются информационно-аналитической основой проведения расчетов и оценки эволюции персональных и групповых рисков здоровью [9]. Однако применение подобных технологий пока остается ограниченным, а методология интеграции этих технологий в процесс отбора сотрудников не проработана в достаточной степени. Также интересны подходы экспресс-тестирований. Так, в работе Щелкановой Е.С. и др. (2024), представлен механизм формирования правил прогнозирования профессиональной психологической пригодности с точностью более 91% на основе тестирования акцентуаций личности [10].

Целью настоящего исследования является разработка комплексного подхода к оценке профессиональной пригодности, который включает как традиционные методы, так и новые инструменты анализа, такие как психофизиологическое тестирование в условиях моделирования стрессовых отвлекающих ситуаций. Это позволяет не только выявить уровень готовности сотрудников к выполнению опасных задач, но и оценить их потенциальную устойчивость к стрессу, скорость реакции и точность действий в экстремальных условиях. Практическая значимость заключается в доступности его применения в кадровой практике

для минимизации рисков, связанных с человеческим фактором, что особенно важно для отраслей с высокой степенью ответственности.

Методология. В исследовании участвовали 50 сотрудников из различных отраслей с опасными и вредными условиями труда: горнодобывающей, химической и строительной. Участники представляли три профессиональные группы: шахтёры и машинисты на подземных работах (13 человек), операторы химической промышленности (18 человек) и промышленные альпинисты, работающие на предприятиях повышенной опасности (19 человек). Анализу были подвергнуты разные группы работников для возможности сравнения результатов, так как исследования показывают, что вариативность индивидуальных личностных и групповых качеств приводит к тому, что рабочие не являются равными друг другу по способностям, склонности к риску и производственным травмам. Поскольку корректировка психофизиологических качеств работника является весьма трудоемкой, целесообразно изначально не привлекать на травмоопасную работу тех лиц, индивидуальные качества которых не предопределяют их достаточную защищенность от производственных травм. В этом контексте заблаговременное определение склонности кандидатов на ответственные и опасные должности к травмам позволит повысить эффективность процедуры профессионального отбора [11].

Средний возраст респондентов составил 36 лет (от 25 до 50 лет), стаж работы – от 2 до 20 лет. Все участники добровольно согласились участвовать в исследовании, предварительно подписав информационное согласие.

Исследование состояло из трёх этапов: сбор данных с использованием анкетирования, медицинских обследований и психофизиологических тестов в двух вариациях – комфортные условия и симуляция стрессовых условий. В конце был проведен анализ полученных данных с использованием статистических методов.

1. Анкетирование. Каждый участник заполнил анкету, содержащую вопросы о стаже, профессии, уровне стресса на работе, привычках, самооценке здоровья и опыте работы в аварийных ситуациях. Анкета позволила собрать базовую информацию об участниках и их субъективной оценке своих навыков и состояния здоровья.

2. Медицинское обследование. Медицинское обследование необходимо для объективной оценки физических параметров, влияющих на профессиональную пригодность. Для регистрации физиологических показателей использовались биометрические датчики. Участникам проводились стандартные обследования:

– Измерение артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) до выполнения тестов.

– Измерение артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) во время выполнения тестов в норме.

– Измерение артериального давления (АД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС) во время выполнения тестов в стрессовых условиях.

3. Психофизиологическое тестирование. Психофизиологическое тестирование выбрано для оценки ключевых когнитивных и поведенческих характеристик, которые важны для работы в экстремальных условиях:

– Тест на скорость реакции: реакция на смену цвета на экране с выведением среднего времени (в мс), посредством интернет-ресурса [12].

– Тест на устойчивость внимания (цифровая корректурная проба Бурдена): отметка определённого числа среди 40 цифровых рядов по 40 чисел в каждом за 3 минуты. Тестирование выполнялось посредством онлайн-сервиса [13].

– Тест на переключение внимания: таблица «Горбова-Шульте» (рис. 1)

7	8	13	11	22	19	6
1	20	24	3	8	13	10
17	14	4	16	11	10	22
9	23	19	5	17	12	1
14	23	9	12	18	5	21
4	2	25	15	15	2	16
6	20	18	7	21	24	3

Рисунок 1 – Таблица «Горбова-Шульте»

Задание подразумевает концентрацию на центре таблицы и поиск чисел от 1 до 24 периферическим зрением. Сначала поиск среди чёрных цифр, затем среди красных. В оценку идёт итоговое время в секундах.

– Оценка стрессоустойчивости: выполнение вышеописанных тестов в условиях ограниченного времени, звуковых и физических отвлекающих факторов – звуки сирены, фоновый шум людей, всплывающие уведомления вокруг зоны выполняемого задания, таймер с отчётом времени на выполнение задания.

Полученные данные были проанализированы с использованием статистического пакета *MS Excel*. Применялись методы описательной статистики и корреляционного анализа.

Результаты. Анализ данных анкетирования показал следующее процентное распределение:

16% участников – выявлен высокий уровень стресса;

10% участников – жалобы на хроническую

усталость, что подчеркивает необходимость оценки не только физической, но и психофизиологической пригодности к работе;

88% участников оценили своё здоровье как «удовлетворительное» или «хорошее»;

20% участников отметили регулярные трудности с концентрацией внимания;

64% участников сообщили о хроническом стрессе, связанном с выполнением профессиональных обязанностей.

Дистресс – это состояние организма работника, находящегося в острой негативной форме стресса, возникающего в ответ на неблагоприятные или угрожающие события, имеет положительную корреляцию со стажем (r = 0,61). Состояние хронического стресса характерно для 3 и 4 класса результатов специальной оценки условий труда (СОУТ), когда полное восстановление физического и психического здоровья работника не происходит в течение установленного времени отдыха [14]. У работников, продолжительное время трудящихся в контакте с вредным и (или) опасным производственным фактором, на ранних стадиях наблюдаются отдельные нарушения в состоянии здоровья без формирования чётко очерченного клинического синдрома, что недостаточно для установления клинического диагноза заболевания, но позволяет предположить развитие ранних признаков специфического воздействия фактора [15]. Сотрудники в первую очередь подвержены стрессу из-за рисков для здоровья и безопасности, снижения производительности и негативных эмоций [16].

Медицинские показатели (артериальное давление, пульс, сатурация) выявили, что 14% участников имели отклонения, влияющие на пригодность к опасным и вредным работам. У 8% участников наблюдалось пониженное артериальное давление – гипотония. У 6% выявлен низкий уровень сатурации при высоком пульсе в состоянии без нагрузки, что может быть критично для сотрудников на подземных работах. Выявлена отрицательная корреляция (r = -0,7) между значительным повышением пульса и стажем работы при выполнении заданий – молодые специалисты наиболее взволнованы при выполнении стресс-тестирований, что снижает их результативность.

Результаты психофизиологического тестирования представлены следующими показателями:

1. Время реакции. В среднем скорость реакции человека составляет 219 милисекунд (мс). У большинства людей она составляет 174-270 мс. Показатели от 270 мс и выше говорят о замедленной реакции. Среднее время реакции испытуемых каждой группы на визуальные сигналы составило 250, 7 мс в норме и 273,7 мс при стресс-тестах (табл. 1).

Разброс показателей свидетельствовал о значительных индивидуальных различиях. Наибольшее время реакции (выше 284 мс) отмечалось у участников с высоким уровнем стресса и малым опытом работы – у 12% респондентов с корреляцией r=0,8. На наш взгляд, наименьшая разница между тестами в тишине и стресс-тестами (5,6%) наблюдается у шахтёров, т.к. для них привычна работа в условиях повышенного шума и отвлекающих факторов. Для операторов химической промышленности данный показатель превышает 13%, что может быть связано с привычностью работы без ярких отвлекающих факторов.

Таблица 1 – Оценка времени реакции

Группа / Показатель	Время реакции в нормальных условиях, мс	Время реакции в стрессовых условиях, мс	Разница, %
Шахтёры и машинисты подземных работ	256	271	5,6
Операторы химической промышленности	251	284	13,2
Промышленные альпинисты	245	266	8,6
Среднее время реакции, с	250,7	273,7	9,01

2. Тест на устойчивость внимания. Уровень развития концентрации внимания свыше 81% считается очень хорошим, от 60 до 80% – хорошим, ниже – средним и плохим. Точность выполнения задач по цифровой корректурной пробе Бурдена оценена в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка устойчивости внимания

Группа / Показатель	Точность выполнения задач в нормальных условиях, %	Точность выполнения задач в стрессовых условиях, %	Разница, %
Шахтёры и машинисты подземных работ	87	80	8,1
Операторы химической промышленности	93	88	5,4
Промышленные альпинисты	88	82	6,8
Средний показатель, с	89,3	82,7	7,4

Участники, испытывающие повышенный уровень усталости, справлялись с заданиями на 15% хуже, что подтверждает значимость когнитивных способностей и негативного влияния дистресса для профессиональной пригодности, что подтверждается и другими исследованиями [17]. Средний показатель всех сотрудников даже при стресс-тестах находится на высоком уровне развития концентрации внимания, что демонстрирует навыки работы в условиях повышенных требований к внимательности.

3. Тест на переключение внимания. Результаты тестирования с помощью таблицы Горбова-Шульте представлен в таблице 3.

По результатам исследований у 30% группы шахтёров и машинистов подземных работ отмечаются жалобы на высокую усталость зрения,

что может быть связано с высоким напряжением зрительных анализаторов в условиях постоянного переключения внимания. Несмотря на то, что операторы химической промышленности продемонстрировали снижение показателей в стрессовых условиях на 9,1%, время выполнения задания меньше, чем у двух остальных групп в нормальных условиях.

Таблица 3 – Оценка переключения внимания

Группа / Показатель	Скорость выполнения задания в норме, мин	Скорость выполнения задания в стрессовых условиях, мин	Разница, %
Шахтёры и машинисты подземных работ	5,2	5,4	3,8
Операторы химической промышленности	4,4	4,8	9,1
Промышленные альпинисты	4,9	5,2	6,1
Средний показатель, с	4,83	5,13	6,2

Обсуждение. В рамках проведённого исследования выявлены значимые факторы, влияющие на профессиональную пригодность сотрудников для выполнения опасных и вредных работ. Применение комплексного подхода, включающего анкетирование, медицинское обследование, психофизиологическое тестирование с симуляцией стрессовых ситуаций, позволило оценить ключевые аспекты физической и психической готовности действующих сотрудников опасных производств. Полученные данные подтверждают, что психофизиологические характеристики, такие как время реакции и стрессоустойчивость, являются значимыми для успешного выполнения профессиональных обязанностей в условиях высокого риска. Например, сотрудники с более высокой стрессоустойчивостью демонстрировали меньше ошибок и более быстрое время реакции. Участники с нарушениями физиологических параметров, особенно те, кто испытывал хроническую усталость, показывали худшие результаты в стресс-тестах. Обнаружена корреляция между стажем работы и реакцией на стресс-факторы: r=-0,8 при оценке времени реакции, r=-0,71 при оценке пульса во время стресс-тестирований. На основании полученных данных можно сделать вывод о важности предварительной подготовки и отбора молодых специалистов на базе стресс-тестов. Дистресс имеет положительную корреляцию со стажем (r = 0,61), что свидетельствует о необходимости регулярной оценки состояния физического и психофизиологического состояния сотрудников для периодической аттестации и допуска к работе в опасных и вредных условиях или направления их на медицинское или психологическое лечение. Исследования, представленные в данной работе, дают возможность прогнозирования профессиональной пригодности не только для молодых специалистов, но и для сотрудников с большим стажем.

Таким образом, проанализировав полученные результаты можно выявить следующие критерии оценки профессиональной пригодности лиц, направляемых на работы во вредных и/или опасных условиях труда, на основе комплексного обследования. К ним относятся:

1. Соответствие требованиям профессионального стандарта – проводится оценка соответствия компетенции потенциального работника требованиям профессионального стандарта, включая наличие необходимых документов об образовании и сертификатов.

2. Анамнез состояния здоровья – учитывается наличие заболеваний, в том числе хронических, вредных привычек, которые могут повлиять на ухудшение самочувствия работника в тяжелых условиях и способность выполнять профессиональные обязанности.

3. Физическое состояние – проводится оценка функционального состояния основных систем организма: сердечно-сосудистой, дыхательной, опорно-двигательной и нервной систем. Включает в себя результаты медицинских и лабораторных исследований, полученных при прохождении предварительного и/или периодического медицинского осмотров.

4. Психоэмоциональное состояние – оценивается уровень стрессоустойчивости, психической устойчивости, наличие признаков профессионального выгорания или психических расстройств. Для определенных специфичных профессий оценка по данному критерию также включает проведение функциональных проб, которые могут включать тесты на быстроту реакции, оценку устойчивости и переключения внимания.

5. Профессиональные риски – определяются на основе анализа факторов производственной среды и трудового процесса, которые потенциально могут угрожать здоровью работника, включая физические, химические, биологические, психофизиологические. Уровни профессиональных рисков могут быть определены по результатам СОУТ с учетом дополнительной оценки травмоопасности рабочего места.

6. Результаты реабилитационных программ – оцениваются для работников, которые уже прошли реабилитацию после заболеваний или травм, важно учитывается степень восстановления здоровья работника и дальнейшая возможность выполнения профессиональных обязанностей.

На основе собранных данных формируется заключение о профессиональной пригодности работника в условиях вредности или необходимости отстранения от опасных работ. Важно учитывать принадлежность к определенной профессиональной группе и специфику выполняемых работ. Окончательное решение о профессиональной пригодности работника принимается коллегиально специально созданной экспертной группой предприятия, с

привлечением специалистов в области медицины, психологии и охраны труда.

Выводы. Разработанная методика оценки может быть внедрена в системы профессионального отбора и регулярных профессиональных аттестаций, позволяя минимизировать риски возникновения аварий и несчастных случаев. Направления будущих исследований могут включать углублённое изучение влияния хронического стресса и усталости на результаты профессиональной деятельности в опасных профессиях и разработку методик реабилитации и восстановления сотрудников с низкой стрессоустойчивостью или ухудшением когнитивных способностей. Таким образом, результаты данного исследования закладывают основу для дальнейшей разработки эффективных инструментов отбора и подготовки кадров в профессиях с повышенными рисками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Abikenova, S., Issamadiyeva, G., Kulmagambetova, E., Daumova, G., Abdrakhmanova, N. Assessing occupational risk: A classification of harmful factors in the production environment and labor process// International Journal of Safety and Security Engineering. 2023. Vol. 13(5): P. 871-881.

2. Глушко, А.Н., Подкосов, С.В., Киселева, Е.А. Детерминация профессиональной пригодности курсантов академии МЧС// Вестник ТвГУ. Серия: Педагогика и психология. – 2024. – №3. – С. 38-48.

3. Дубинский А.А., Булыгина В.Г., Белякова М.Ю. Индивидуально-психологические особенности сотрудников силовых структур с различным стажем и профилем профессиональной деятельности// Медицина труда и промышленная экология. 2021. – № 61(5). – С. 340–346.

4. Булавка Ю.А., Адамович Д.Н. Совершенствование процедуры профессионального отбора персонала для работы на опасных производственных объектах нефтеперерабатывающей отрасли// Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 1(47). – С. 108-112.

5. Армаш, С.А. Экспертиза профессиональной пригодности в реалиях нового времени// Здравоохранение Югры: опыт и инновации. – 2023. – № 3(40). – С. 44-52.

6. Толочек В.А. Профессиональный отбор: парадигмы XX и XXI столетий. часть вторая// Организационная психология. 2022. № 12(1). – С. 228-247.

7. Mukherjee, I., Krishnan, L.R. Impact of AI on aiding employee recruitment and selection process// Journal of the International Academy for Case Studies. – 2022. – Vol. 28(S2). – P. 1-15.

8. Забержинский Б.Э. Машинное обучение в системах оценивания пригодности соискателей для вакансий// Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 5. – С. 19-23.

9. Зайцева, Н.В., Кирьянов, Д.А., Землянова, М.А., Горяев, Д.В. и др. Концептуальные основы корпоративной интеллектуальной риск-ориентированной системы анализа, прогноза и профилактики профессиональных и производственно-обусловленных нарушений здоровья работников// Анализ риска здоровью. – 2023. – №4. – С.19-32.

10. Щелканова Е.С., Амирасланов Т.Ф. Экспресс-диагностика профессиональной психологической пригодности военнослужащих по призыву// Медицина катастроф. – 2024. – № 1. – С. 59-65.

11. Кабанов Е.И., Туманов М.В., Сметанин В.С., Романов К.В. Инновационный подход к профилактике травм на горнодобывающих предприятиях на основе управления человеческим фактором// Записки Горного института. – 2023. – № 263. – С. 774-784.

12. https://mozgion.ru/test-trenazher-na-skorost-reakcii/

13. https://metodorf.ru/tests/korrekt/korrektchis.php?method=korrektchis&mod=start&screen=big#main

14. Цуциев С.А. О допустимости работы во вредных и (или) опасных условиях труда// XXI век. Техносферная безопасность. – 2024. – № 9(1). – С.71-84.

15. Бухтияров И.В., Кузьмина Л.П., Измерова Н.И., Головкова Н.П. и др. Совершенствование механизмов выявления ранних признаков нарушения здоровья для сохранения трудового долголетия // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – № 62(6). – С.377-387.

16. Chen, B., Wang, L., Li, B., Liu, W. Work stress, mental health, and employee performance. Frontiers in psychology. 2022. Vol. 13. – Article 1006580/

17. Бухтияров И.В., Жбанкова О.В., Юшкова О.И., Гусев В.Б. Новые психофизиологические подходы, применяемые при профотборе кандидатов в опасные профессии // Медицина труда и промышленная экология. 2022. – №59 (3). – С. 132-141.

Статья поступила в редакцию 02.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.453
EDN: GWPZBY

ВАЛИДАЦИЯ АЭРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В КАБИНЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО КРАНА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3720-4160
AuthorID: 140003
ORCID: 0000-0003-0644-7412
ResearcherID: E-8171-2014)
ScopusID: 56958488600

БУЛЫГИН Юрий Игоревич, доктор технических наук,
профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»
Донской государственный технический университет
(344003, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1, e-mail: bulyur_rostov@mail.ru)

SPIN: 2633-4832
Author ID: 971212
ORCID: 0000-0003-4618-029X
Researcher ID: ABF-3154-2020
Scopus ID: 57207456599

МАСЛЕНСКИЙ Виктор Валерьевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»
Донской государственный технический университет
(344003, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1, e-mail: vmaslenskii@donstu.ru)

SPIN: 8874-2616
AuthorID: 1178285
ORCID: 0000-0001-6861-3987

АШИХМИН Денис Валерьевич, аспирант кафедры
«Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды»
Донской государственный технический университет
(344003, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1, e-mail: ashihmindenis150498@gmail.com)

Аннотация. Условия труда машинистов железнодорожных кранов определяются воздействием метеорологических показателей на ограждения кабины и характеризуются как вредные подклассов 3.2 и 3.3. Для исследования аэротермодинамических процессов внутри кабины необходимо применить комплексный подход к объекту исследования (физическое, математическое и компьютерное моделирование). Целью исследования являлось создание адекватной аэротермодинамической конечно-элементной модели для определения параметров микроклимата и валидация полученных результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными. В качестве математической модели была принята система усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. В качестве инструмента для реализации модели использовалась универсальная программа конечно-элементного анализа *ANSYS*. Для валидации аэротермодинамической модели был получен большой массив экспериментальных данных по параметрам микроклимата в холодный и теплый период года в кабинах эксплуатируемых железнодорожных кранах. Результаты моделирования показывают, что в условиях нагревающего микроклимата внутри кабины невязка с экспериментальными значениями составила 3-5°С, а относительная погрешность 14,3%, а для охлаждающего микроклимата разница между внешней и внутренней температурами составляет не более 1-2°С, относительная погрешность находится в районе 7,2%. Представленная аэротермодинамическая модель, проверенная на экспериментальных данных, может служить инструментом для прогнозирования параметров микроклимата в кабинах рассматриваемых машин в различных условиях их эксплуатации.

Ключевые слова: безопасность труда, железнодорожные краны, производственный микроклимат, тепломассоперенос, экспериментальные данные, моделирование аэротермодинамических процессов, валидация, нормализация микроклимата.

VALIDATION OF AN AEROTHERMODYNAMIC MODEL FOR DETERMINING THE MICROCLIMATE PARAMETERS IN A RAILWAY CRANE CABIN

© The Author(s) 2025

BULYGIN Yuri Igorevich, doctor of technical sciences, professor of the Department of «Life Safety»
Don State Technical University
(344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin square 1, e-mail: bulyur_rostov@mail.ru)
MASLENSKY Viktor Valerievich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of «Life Safety»
Don State Technical University

(344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin square 1, e-mail: vmaslenskii@donstu.ru)
ASHIKHMIN Denis Valerievich, graduate student of the Department of «Life Safety»
Don State Technical University
(344003, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin square 1, e-mail: ashihmindenis150498@gmail.com)

Abstract. The working conditions of railway crane operators are determined by the impact of meteorological indicators on the cabin fences and are characterized as harmful subclasses 3.2 and 3.3. To study the aerothermodynamic processes inside the cabin, it is necessary to apply an integrated approach to the object of study (physical, mathematical and computer modeling). The purpose of the study was to create an adequate aerothermodynamic finite element model to determine the microclimate parameters and validate the obtained results of computer modeling with experimental data. The system of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations was adopted as a mathematical model. The universal finite element analysis program *ANSYS* was used as a tool for implementing the model. To validate the aerothermodynamic model, a large array of experimental data was obtained on the microclimate parameters in the cold and warm periods of the year in the cabins of operating railway cranes. The simulation results show that under the conditions of a heating microclimate inside the cabin, the discrepancy with the experimental values was 3-5°C, and the relative error was 14.3%, and for a cooling microclimate, the difference between the external and internal temperatures was no more than 1-2°C, the relative error was around 7.2%. The presented aerothermodynamic model, tested on experimental data, can serve as a tool for predicting the microclimate parameters in the cabins of the machines under consideration under various operating conditions.

Keywords: occupational safety, railway cranes, industrial microclimate, heat and mass transfer, experimental data, modeling of aerothermodynamic processes, validation, normalization of microclimate.

Для цитирования: *Булыгин Ю.Н. Валидация аэротермодинамической модели для определения параметров микроклимата в кабине железнодорожного крана / Ю.Н. Булыгин, В.В. Масленский, Д.В. Ашихмин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 220-227. – EDN: GWPZBY.*

Введение. Обеспечение безопасных условий труда на рабочих местах является первостепенной задачей, особенно на объектах с повышенной опасностью [1]. Актуальность обеспечения безопасных условий труда машинистов железнодорожных кранов определяется не только тем, что они относятся к подъемным сооружениям [2], но и тем, что эксплуатируются на железнодорожном транспорте, где необходимо решать вопросы транспортной безопасности [3]. Машинисты железнодорожных кранов испытывают постоянное воздействие внешних вредных факторов, влияющих на рабочий процесс, причем эксплуатация технологических машин данного вида производится в широком диапазоне климатических условий, что ставит проблему нормализации параметров микроклимата в кабине на одно из первых мест [4].

Объектом исследования выбраны кабины железнодорожных кранов марки КЖ-561, эксплуатируемых в различных метеорологических условиях.

Цель исследования – создание адекватной аэротермодинамической конечно-элементной модели определения параметров микроклимата и валидация полученных результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными.

В качестве инструмента для реализации имитационной модели использовалась универсальная программа конечно-элементного анализа *ANSYS* [5, 6], обладающая широким спектром модулей, предусматривающих конструирование процессов тепломассопереноса [7, 8].

Была реализована аэротермодинамическая модель, позволяющая всесторонне описать исследуемые процессы тепломассопереноса [9]. При моделировании учитывалась скорость и направление переноса воздушных масс и условия воздействия разных уровней температур на внешние грани кабины.

Методология. Известно, что валидация представляет собой процесс определения степени соответствия математической модели реальному физическому объекту в рамках области планируемого использования данной модели [10]. Поэтому для определения параметров микроклимата в кабине железнодорожного крана нами изначально были проведены экспериментальные исследования, а именно измерения в рамках специальной оценки условий труда (СОУТ) и производственного контроля [11]. Именно эмпирические исследования позволяют хорошо описать физический объект и выяснить влияние на него внешних факторов и условий эксплуатации.

Измерения проводились одновременно, как параметров микроклимата на рабочем месте машиниста технологической машины, так и показателей метеоусловий. В ходе проведения измерений параметров микроклимата были определены: температура воздуха внутри кабины, скорость движения воздуха, относительная влажность и THC-индекс. Все измерения проводились многократно на двух уровнях по вертикали (расстояния от пола кабины): 0,1 м и 1 м [12]. Таким образом исследования охватили 34 железнодорожных крана в теплый период года и 32 машины – в холодный.

Согласно конструкторской документации в кабине крана типа КЖ предусматривается внешний кондиционер с холодопроизводительностью всего 1 кВт, что явно недостаточно для эффективного

охлаждения [13] даже не в экстремальных условиях эксплуатации. Кроме того, далеко не все кабины железнодорожных кранов оборудованы кондиционерами, а часть из них находится в неисправном состоянии. Поэтому вполне логичным является то, что мы в первом приближении, решили провести предварительные модельные расчеты (первая итерация) для случая неработающей системы кондиционирования. Система отопления также является недостаточной для компенсирования внешнего воздействия до оптимальных температур, однако позволяет держать температурные показатели внутри в районе 15-16°С [14].

Основываясь на данной гипотезе, эмпирическая выборка по охлаждающему микроклимату была разделена на замеры при работающей системе отопления и при отсутствии компенсации.

Для проведения численного моделирования сперва была построена трехмерная модель кабины крана КЖ-561 (рис. 1) согласно конструкторской документации с последующей верификацией геометрическими измерениями на реальном объекте исследования.

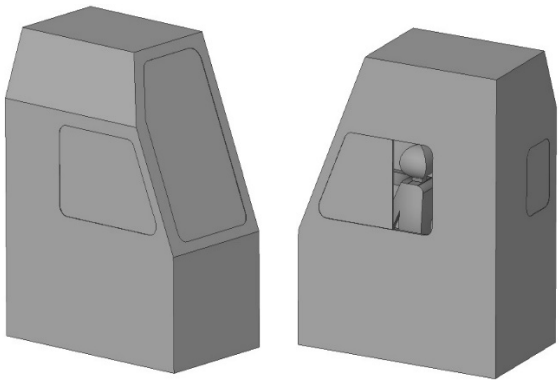


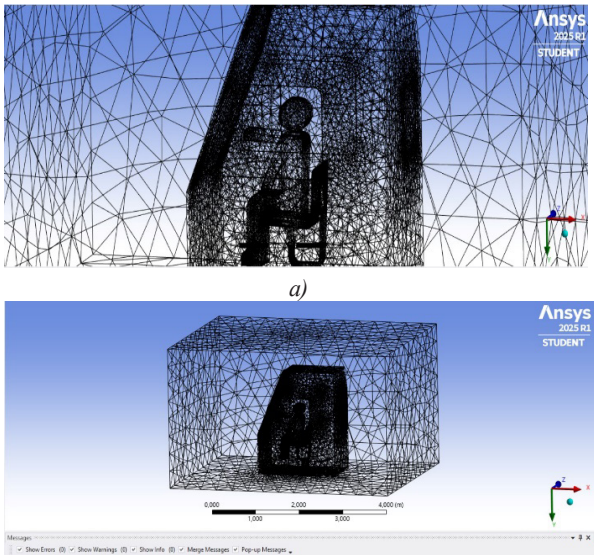
Рисунок 1 – Исходная геометрия кабины железнодорожного крана КЖ-561

Многослойность и неоднородность структуры ограждающих конструкций кабины учитывалась через осредненные коэффициенты теплопередачи изолирующих и облицовочных материалов по каждой стенке (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики ограждающих конструкций кабины

Поверхность	Коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К	Площадь, м²
Крыша	4,39	0,5
Пол	1,77	1,29
Передняя стенка (металл)	4,39	0,9
Передняя стенка (стекло)	4,87	0,76
Боковые стенки (металл)	4,39	4,54
Боковая стенка (стекло)	4,96	1,33
Задняя стенка (металл)	4,39	1,33
Задняя стенка (стекло)	4,96	0,18

На первом этапе все пространство кабины и область вокруг представляется расчетной сеткой конечных элементов в виде тетраэдральных ячеек (рис. 2). Внешний воздушный домен задается значительно большего размера чем габариты кабины для правильного отображения ветровой составляющей.



а)

б)

Рисунок 2 – Сетка конечных объемов: а) внутреннего домена, б) внешнего домена

Сетка конечных объемов модели кабины железнодорожного крана имеет параметры, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры расчетной сетки

Наименование	Значение
Максимальный размер ячейки	140 мм
Максимальная толщина пристеночного слоя	60 мм

В качестве математической модели была принята система усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, которые разлагаются на среднюю и флуктуирующую составляющие. Уравнение неразрывности (1) выражает закон сохранения массы, т.е. говорит о том, как движется вещество. Уравнение сохранения импульса (2) описывает изменение количества движения в среде. Уравнение теплопроводности (3) характеризует изменение внутренней энергии среды с течением времени.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u^T) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho H u) = -\nabla u \cdot (\rho u) + \nabla \cdot (\tau \cdot u) - \nabla \cdot q, \quad (3)$$

где ρ – плотность среды (воздуха); t – время; ∇ – оператор набла; u – векторное поле скорости потока; p – давление; τ – тензор вязких напряжений; g – гравитационное воздействие; $H = \varepsilon + u^2$ – полная энергия; ε – энтальпия; q – теплопроводная

диссипация.

Для описания движения турбулентного потока существуют различные модели турбулентности. В текущем исследовании использовалась стандартная *k*-*ε* модель турбулентности [15], которая представляется в виде следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k\bar{u_i})=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+$$
$$+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon\bar{u_i})=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+$$
$$+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_\varepsilon+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon, \quad (5)$$

где G_k – кинетическая энергия турбулентности; G_b – кинетическая энергия выталкивающей силы; $C_{3\varepsilon}$ – параметр, характеризующий величину влияния выталкивающей силы на ε; Y_m – параметр, определяющий воздействие переменного расширения на скорость диссипации. Оставшиеся параметры получены экспериментальным путем [16] и имеют следующие величины: $C_{1\varepsilon}$ =1,44; $C_{2\varepsilon}$ =1,92; σ_k=1,44; σ_ε =1,3.

Для широкого охвата условий эксплуатации железнодорожных кранов рассматривались различные варианты воздействия на параметры внутренней среды. В нагревающем микроклимате моделировались 3 режима скорости ветра (3,3 м/с, 6,6 м/с, 9,9 м/с), 3 соотношения внешней температуры воздуха и температуры стенок кабины (30/35°С, 35/45°С, 40/55°С), 2 направления потока воздуха (фронтальное, боковое), 2 условия эксплуатации (открытая или закрытая боковая форточка). Для охлаждающего были рассмотрены 3 режима внешней температуры (-15°С, 0°С, 15°С). В обоих случаях проводилась имитация эксплуатационной среды при неработающих системах кондиционирования или отопления.

Результатом проведенного моделирования стал набор из 39 вариаций выходных параметров рабочей зоны машиниста железнодорожного крана на основе различных сочетаний входных условий.

Результаты. Работа железнодорожного крана в основном происходит на станциях и железнодорожных узлах различных регионов страны. Крановые работы сопровождаются незначительным уровнем запыленности и загазованности воздуха, проникающим в кабины машины, в отличие от металлургических и литейных кранов [17]. Зачастую машинисты кранов открывают форточку бокового окна для попытки нормализации температуры в жару, поскольку система охлаждения либо не работает, либо совсем не справляется с нагрузкой. Такое эксплуатационное решение незамедлительно повышает скорость перемещения нагретых воздушных масс и образует сквозняки [18]. На рисунке 3 представлен результат моделирования при вышеописанных условиях.

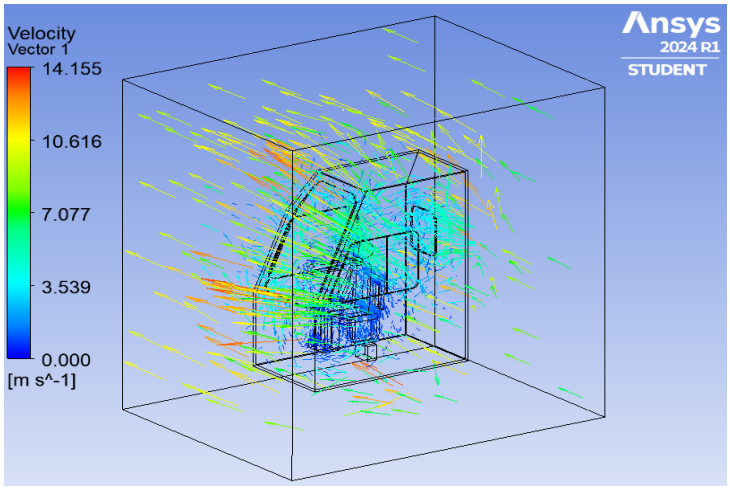


Рисунок 3 – Векторы движения воздуха в кабине железнодорожного крана с открытой форточкой окна при боковом ветре (3D)

При таком «естественном» способе охлаждения машинист крана испытывает воздействие более высоких показателей подвижности воздуха, чем того требуют санитарно-гигиенические нормы по микроклимату (0,4…1,5 м/с) и приводит к росту заболеваемости ОРЗ. В зоне расположения головы работника наблюдается (рис. 4) наибольшая подвижность воздуха в кабине и составляет 4…6 м/с при внешней скорости ветра 6,6 м/с.

Наличие большой зоны сквозняков в области затылка и шеи машиниста связано с особенностями геометрического расположения окна в кабине крана (напротив головы). На уровне спины машиниста также формируются повышенные подвижности воздуха порядка 1,2…1,6 м/с [19].

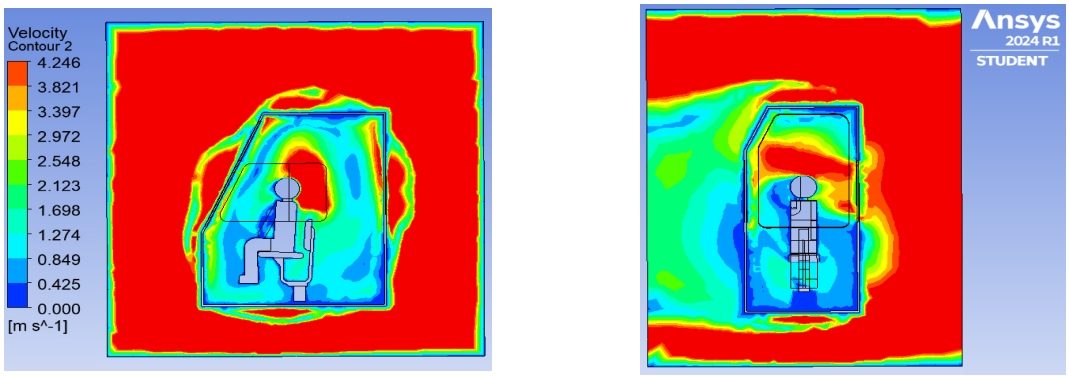
Параметры температуры моделировались в зависимости от нагрева стенок кабины извне посредством солнечной радиации. На ограждения кабины зачастую приходится настолько большой поток теплового излучения с течением большого количества времени, что под его воздействием температура стенок спокойно может достигать более

50°С. Моделирование такого экстремального случая представлено на рисунке 5.

Формируемое поле температур воздуха в кабине характеризуется тем, что у ограждений кабины температура максимальна, а при удалении от них плавно уменьшается в направлении тела машиниста.

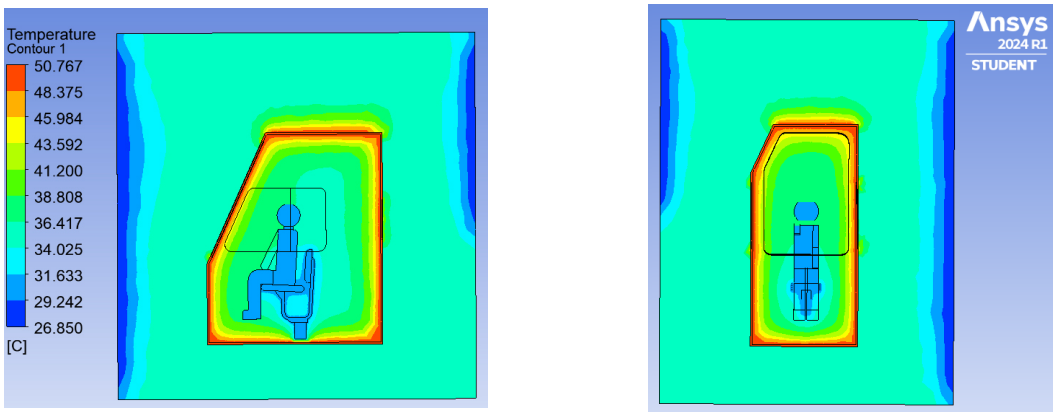
Дополнительно для нагревающего микроклимата возьмем более близкие входные параметры внешней среды к реальным. На рисунке 6 представлены результаты проведенного моделирования на основе следующего набора задаваемых параметров: скорость ветра – 6,6 м/с, температура окружающей среды – 30°С, температура стенок кабины – 35°С, направление ветра – боковое, открыта боковая форточка. Такой набор значений соответствует среднестатистическому состоянию окружающей среды в теплый период года в Ростовской области примерно в полдень, когда температура стенок еще не нагрета до максимального состояния.

Помимо имитации микроклиматических параметров в теплый период года также был рассмотрен и охлаждающий микроклимат. Для его иллюстрации взят режим с внешней температурой 15°С, показанный на рисунке 7.



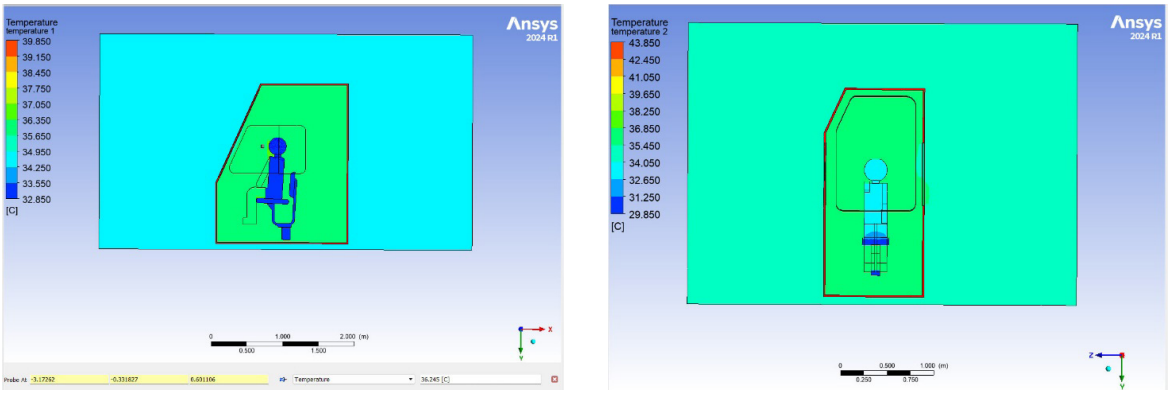
а) *б)*

Рисунок 4 – Поля подвижности воздуха внутри кабины крана с открытой форточкой при боковом ветре 6,6 м/с: а) вид сбоку, б) вид спереди



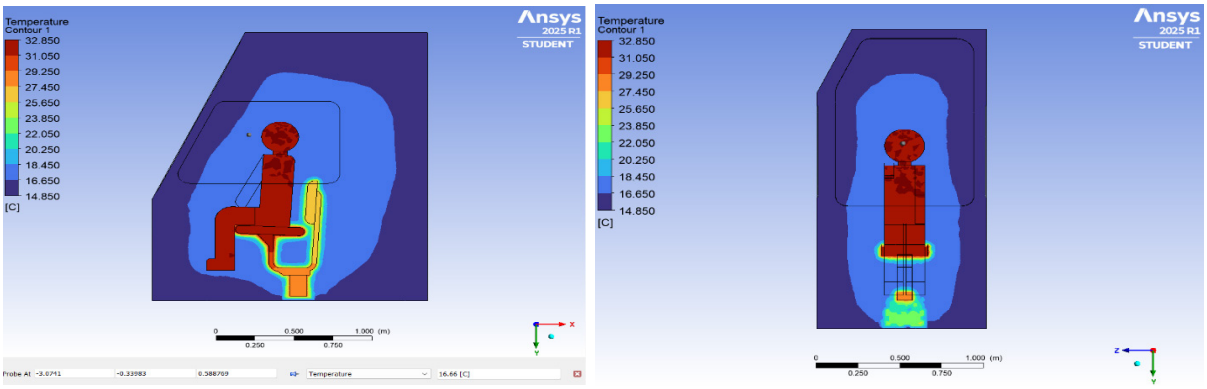
а) *б)*

Рисунок 5 – Поля температуры ограждений кабины и воздуха внутри: а) вид сбоку, б) вид спереди



а) *б)*

Рисунок 6 – Результаты моделирования при нагревающем микроклимате: а) вид сбоку, б) вид спереди



а) *б)*

Рисунок 7 – Результаты моделирования температуры внутри кабины при 15°С окружающей среды: а) вид сбоку, б) вид спереди

Обсуждение. Численные результаты, полученные при компьютерном моделировании необходимо сравнивать с реальными экспериментальными данными. В настоящем исследовании, полученные расчетом параметры микроклимата рабочей зоны машиниста крана сравнивались с экспериментальными значениями из протоколов измерений карт рабочих мест СОУТ. На рисунке 8 представлены данные эксперимента температурного режима внутри кабины по каждому железнодорожному крану и температура окружающей среды в день измерения.

Для верификации модельных выходных параметров температуры брался наиболее близкий к эксперименту режим – внешняя температура/температура стенки 30°С/35°С. Для таких исходных данных расчетная температура на рабочем месте машиниста составила 30,5°С.

Аналогично проводилось сравнение результатов моделирования с экспериментальными значениями в холодный период года (рис. 9).

Было изучено влияние температуры окружающей среды на параметры микроклимата внутри кабины с неработающими системами отопления.

Внешняя температура задавалась величиной 15°С.

Для верификации модельных выходных параметров температуры брался наиболее близкий к эксперименту режим с внешней температурой 15°С. Для таких исходных данных расчетная температура на рабочем месте машиниста составила 16,5°С.

Экспериментальные данные указывают на то, что исследования проводились далеко не в широком диапазоне возможных значений показателей внешней среды. Для нагревающего микроклимата наибольшей температурой воздуха вне кабины являлось 35°С, а средняя температура составляла 29,7°С. Для охлаждающего – температура окружающей среды не опускалась ниже 0°С и держалась в среднем около 6,5°С [20].

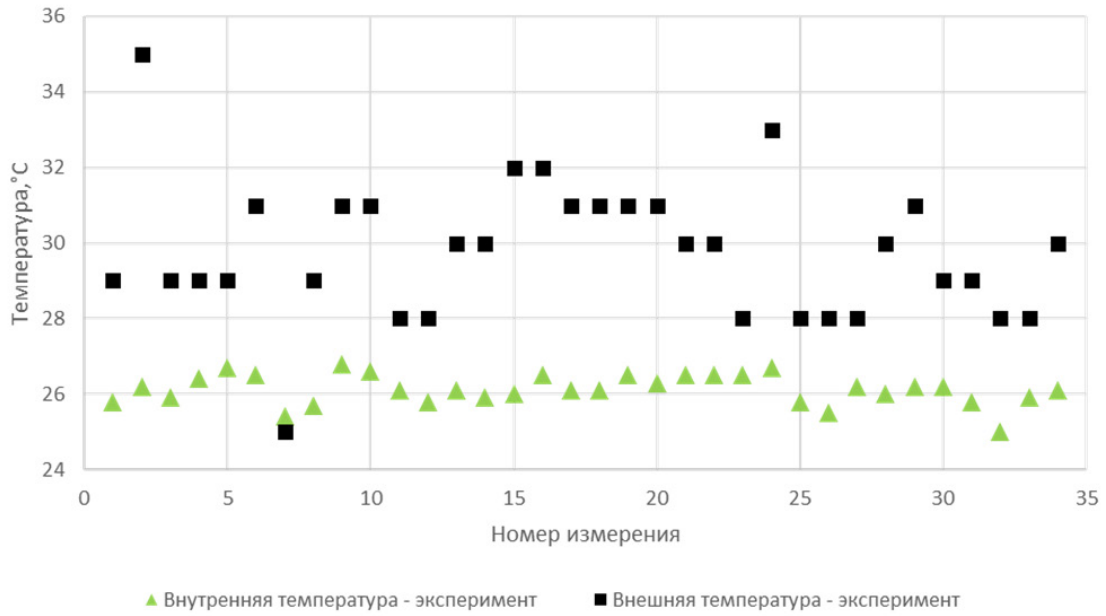


Рисунок 8 – Сравнение внешней и внутренней температуры по результатам экспериментальных исследований для теплого периода года

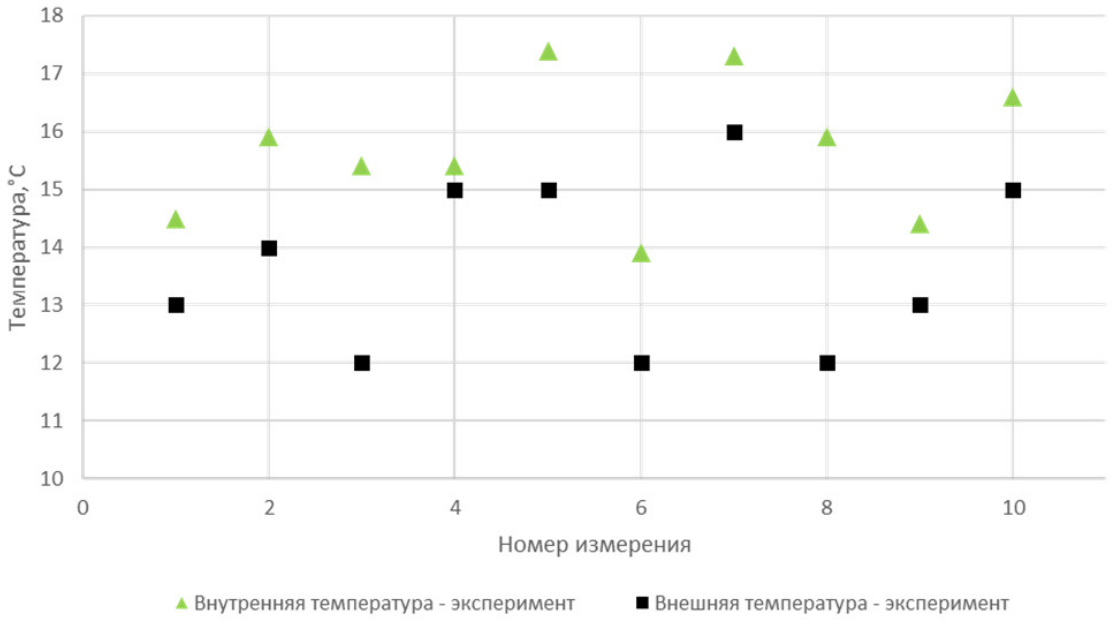


Рисунок 9 – Сравнение внешней и внутренней температуры по результатам экспериментальных исследований для холодного периода года

Выводы. Результаты моделирования показывают, что в условиях нагревающего микроклимата внутри кабины невязка с экспериментальными значениями составила 3-5°С, а относительная погрешность 14,3%. Здесь важно отметить, что сравнение температуры окружающей среды и температуры воздуха внутри кабины показывает, что последняя на 3-5°С ниже внешней (снаружи кабины). Результаты моделирования указывают на отсутствие вышеприведенной закономерности (невязка составляет 0,5-1°С, а температура внутри кабины выше, чем снаружи). Это может объясняться тем, что измерения проводились в самом начале рабочего дня (8-9 утра), когда ограждающие конструкции практически не нагреты и близки к ночным показателям.

В условиях охлаждающего микроклимата экспериментальные и модельные значения температур отличаются незначительно. Массив экспериментальных значений температур достаточно хорошо согласуется с результатами модельных расчетов, разница между внешней и внутренней температурами составляет не более 1-2°С, относительная погрешность находится в районе 7,2%.

В результате валидации аэротермодинамической модели для определения параметров микроклимата в кабине железнодорожного крана установлена:

– необходимость в дополнительных экспериментальных исследованиях в части определения температуры стенок кабины крана (в рамках СОУТ этот параметр не измеряется);

– необходимость дальнейшего компьютерного моделирования с работающими системами кондиционирования и отопления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральный закон от 21.07.1997 №116-ФЗ (ред. от 14.11.2023) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // СПС КонсультантПлюс.

2. Анализ аварийности и травматизма при эксплуатации грузоподъёмных машин и механизмов в России / Ю.И. Булыгин, А.А. Пантузенко, Р.Р. Лазуренко, А.С. Газгиреев // Безопасность техногенных и природных систем. – 2018. – № 3-4. – С. 2-17. – DOI 10.23947/2541-9129-2018-3-4-2-18. – EDN VQFUPN.

3. Давыдочкин, Ю.Н. Нормативное обеспечение в области микроклимата на железнодорожном подвижном составе / Ю.Н. Давыдочкин, Д.В. Емельянов, Л.В. Вербицкая // Локомотив. – 2022. – № 12(792). – С. 6-8. – EDN QZOUFC.

4. Галкина О.В. Обеспечение нормируемого температурного режима в кабинах железнодорожного подвижного состава: дис. … канд. технич. наук: 05.26.01 / О.В. Галкина – М., 2002. – 163 с.

5. Проскурин, А.Ю. Применение технологий компьютерного моделирования при решении аэродинамических задач / А.Ю. Проскурин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 6-1(120). – С. 131-136. – DOI 10.23670/IRJ.2022.120.6.019. – EDN ZFDPSR.

6. Киселев, Н.В. Моделирование процессов тепломассопереноса на основе технологии ANSIS / Н.В. Киселев, В.М. Каравайков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 9-10. – С. 20-26. – EDN PLRDFX.

7. Fedosov, S.V. Heat transfer from a cylindrical heater to a medium with variable thermophysical characteristics and heat source power / S.V. Fedosov, E.U. Abdullazyanov, L.I. Kiyamova // Construction Materials and Products. – 2024. – Vol. 7, No. 6. – DOI 10.58224/2618-7183-2024-7-6-8. – EDN NSQFEY.

8. Heat and mass transfer inspection for slip flow of radiative Maxwell fluid when role of thermal conductivity and viscosity is variable: A Reynolds viscosity model / M. Saeed, T. Abbas, Q. Mahmood Ul Hasan [et al.] // Journal of the Indian Chemical Society. – 2022. – Vol. 99, No. 10. – P. 100709. – DOI 10.1016/j.jics.2022.100709. – EDN FRWCLS.

9. Лепеш, Г.В. Моделирование процесса тепломассопереноса в программной среде Ansys/Fluent при дифференцированном отоплении подземного перехода / Г.В. Лепеш, Т.В. Потемкина, Г.А. Спроге // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2015. – № 4(34). – С. 41-48. – EDN VOOOJR.

10. Способ определения изменений термического

сопротивления и коэффициента теплопроводности по толщине наружного стенового ограждения при теплофизических испытаниях в натурных условиях / П.Н. Муреев, С.В. Федосов, В.Г. Котлов [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 4. – С. 55-64. – DOI 10.25686/2542-114X.2021.4.55. – EDN UIUUGG.

11. Давыдочкин, Ю.Н. Нормативное обеспечение в области микроклимата на железнодорожном подвижном составе / Ю.Н. Давыдочкин, Д.В. Емельянов, Л.В. Вербицкая // Локомотив. – 2022. – № 12(792). – С. 6-8. – EDN QZOUFC.

12. Федеральный закон от 28.12.2013 №426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» // СПС КонсультантПлюс.

13. Ашихмин Д.В., Масленский В.В., Булыгин Ю.И., Мереняшев В.Е. Обоснование выбора методики расчета суммарных теплопоступлений в кабину железнодорожного крана // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 3. – С. 35-42. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-35-42.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664699 Российская Федерация. Расчет параметров климатической системы кабин технологических и мобильных машин: № 2024663468: заявл. 14.06.2024: опубл. 24.06.2024 / В.В. Масленский, Е.М. Щерба, А.В. Павликов, Д.В. Ашихмин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». – EDN MVIVNB.

15. Finite element simulation for microclimate normalization at the crane operator workplace / Yu. Bulygin, V. Maslensky, E. Shchekina [et al.] // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, 01-03 марта 2023 года. Vol. 376. – Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. – P. 03024. – DOI 10.1051/e3sconf/202337603024. – EDN XBJENV.

16. Масленский В.В., Булыгин Ю.И. Конечно-элементный анализ параметров микроклимата в кабине металлургического крана // Безопасность техногенных и природных систем. – 2021. – № 1. – С. 10-20.

17. Масленский В.В. Улучшение условий труда операторов технологических и мобильных машин в условиях нагревающего микроклимата: дис. … канд. технич. наук: 05.26.01 / В.В. Масленский – Ростов-на-Дону., 2021. – 134 с.

18. Шишкина А.А. Сравнительный анализ данных для улучшения условий труда // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 250-252.

19. Development of DDES and IDDES formulations for the k-ω shear stress transport model / M.S. Gritskevich, A.V. Garbaruk, J. Schütze, F.R. Menter // Flow, Turbulence and Combustion. – 2012. – Vol. 88, No. 3. – P. 431-449. – DOI 10.1007/s10494-011-9378-4. – EDN PDPLNR.

20. Ашихмин, Д.В. Выявление статистических закономерностей параметров микроклимата в кабинах железнодорожных кранов / Д.В. Ашихмин // Актуальные проблемы науки и техники. 2024: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19-21 марта 2024 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2024. – С. 172-174. – EDN GVVCRS.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 622.276.04: 504.064:004.032.26
EDN: CFJSYI

ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННОЙ ФИЗИКО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2608-3523
AuthorID: 374777
ORCID: 0000-0002-7997-9551
МАКСИМЕНКО Александр Федорович, доктор технических наук, профессор,
проректор по международной работе
Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
(119991, Россия, Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, e-mail: maksimenko.a@gubkin.ru*)*
SPIN: 2306-2031
AuthorID: 442460
ORCID: 0000-0002-1506-0124
ScopusID: 57209794400
СТАРОКОНЬ Иван Викторович, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой "Автоматизации проектирования сооружений нефтяной и газовой промышленности"
Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
(119991, Россия, Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, e-mail: starokon79@mail.ru)
ORCID: 0009-0005-8943-6955
ResearcherID: NPI-8777-2025
КУЛИКОВ Арсений Владимирович, магистр
Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина
(119991, Россия, Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, e-mail: kab2420001@mail.ru)

Аннотация. Целью проведенного исследования является разработка и проверка эффективности гибридной физико-нейросетевой модели для оценки усталостной долговечности восстановленных сварных соединений конструкций морских платформ, что напрямую связано с обеспечением безопасности труда. Проблема усталостного разрушения является актуальной, поскольку ошибки в оценке ресурса сварных узлов могут привести к серьёзным авариям и представляют угрозу жизни работников. В работе был проведён сравнительный анализ четырёх распространённых методов ремонта сварных соединений на основе гибридного физико-нейросетевого подхода, учитывающего реальные условия эксплуатации. В основу предложенного подхода положена классическая зависимость Баскина, дополненная адаптивным нейросетевым корректирующим слагаемым, позволяющим учитывать особенности реальных эксплуатационных условий. Применение разработанной гибридной модели позволило существенно повысить точность прогнозирования остаточного ресурса, снизив ошибку до 2,3% по сравнению с классическими методами. Дополнительно была получена аппроксимация функции с помощью нейронной сети, что обеспечило возможность оперативного проведения расчётов в производственных условиях. Прозрачность предлагаемой модели, обусловленная физической интерпретацией, упрощает её внедрение на предприятия. Данный подход позволяет количественно оценивать эффективность различных ремонтных технологий при варьировании внешних эксплуатационных условий, что существенно расширяет возможности практического применения модели.

Ключевые слова: морские платформы, сварные соединения, усталостная долговечность, методы ремонта, нейросетевое моделирование, *S-N* кривая, физико-нейросетевая модель, остаточный ресурс, циклические нагрузки, прогнозирование разрушения.

APPLICATION OF A HYBRID PHYSICS-NEURAL NETWORK MODEL FOR THE ANALYSIS OF FATIGUE LIFE OF REPAIRED WELDED JOINTS

© The Author(s) 2025

MAKSIMENKO Aleksandr Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, vice-rector for international affairs
Russian State University of Oil and Gas (national research university) named after I.M. Gubkin
(119991, Russia, Moscow, Leninsky Prospekt, Building 65, Block 1, e-mail: maksimenko.a@gubkin.ru)
STAROKON Ivan Viktorovich, candidate of technical sciences, associate professor,
head of the Department "Design Automation of Oil and Gas Industry Structures"
Russian State University of Oil and Gas (national research university) named after I.M. Gubkin
(119991, Russia, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, Building 1, e-mail: starokon79@mail.ru)
KULIKOV Arsenii Vladimirovich, master's degree holder

Russian State University of Oil and Gas (national research university) named after I.M. Gubkin
(119991, Russia, Moscow, Leninsky Prospekt, 65, Building 1, e-mail: kab2420001@mail.ru)

Abstract. The aim of this study is to develop and validate a hybrid physics–neural network model for assessing the fatigue life of repaired welded joints in offshore platform structures, which is directly related to ensuring occupational safety. The problem of fatigue failure remains highly relevant, as errors in estimating the residual strength of welded joints can lead to serious accidents and pose a threat to workers' lives. A comparative analysis of four commonly used repair methods for welded joints was carried out using the proposed hybrid physics-informed neural network approach, which accounts for real operating conditions. The core of the method is based on the classical Baskin *S-N* relationship, enhanced by an adaptive neural correction component that captures the specifics of actual service conditions. The implementation of the hybrid model significantly improved the accuracy of residual life prediction, reducing the error to 2.3% compared to traditional methods. Additionally, a polynomial approximation of the neural correction function was obtained, enabling efficient calculations in industrial environments. The model's transparency, ensured by its physical interpretability, facilitates its integration into production workflows. This approach also allows for a quantitative assessment of the effectiveness of different repair strategies under varying external conditions, substantially expanding the model's applicability in practical engineering tasks.

Keywords: offshore platforms, welded joints, fatigue life, repair methods, neural network modeling, *S-N* curve, physics-neural network model, residual life, cyclic loads, failure prediction.

Для цитирования: *Максименко А.Ф. Применение совмещенной физико-нейросетевой модели для анализа усталостной долговечности восстановленных сварных соединений / А.Ф. Максименко, И.В. Староконь, А.В. Куликов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 228-234. – EDN: CFJSYI.*

Введение. Обеспечение безопасности труда при эксплуатации морских нефтегазовых сооружений напрямую связано с проблемой прогнозирования усталостной долговечности сварных соединений. Аварийные ситуации, связанные с усталостным разрушением конструкций, приводят не только к экономическим потерям, но и к серьёзной угрозе жизни и здоровью работников [1]. В большинстве случаев причиной отказов является недостаточно точная оценка остаточного ресурса сварных узлов [2].

В инженерной практике усталостная долговечность сварных соединений традиционно оценивается по эмпирическим *S–N*-кривым, среди которых наиболее распространена зависимость Баскина, связывающая амплитуду циклического напряжения с количеством циклов до разрушения [2, 3]. Однако такие классические модели не учитывают специфики технологических процессов восстановления и реальных условий эксплуатации, что ограничивает их точность и надёжность при планировании регламентных работ [4-6].

В последние годы растёт интерес к разработке методов, совмещающих традиционные физические зависимости и современные алгоритмы машинного обучения. Так, было предложено применение «физико-нейросетевых» моделей, позволяющих повысить точность оценки остаточного ресурса металлических конструкций за счёт учёта скрытых факторов [7]. Подобные модели показывают высокую эффективность даже при ограниченном количестве экспериментальных данных [8, 9].

Отдельные исследования показывают перспективность применения статистических регрессионных моделей и методов конечных элементов для решения задач прогнозирования надёжности [10-12].

Тем не менее, большинство существующих подходов остаются либо чисто эмпирическими и плохо экстраполируемыми, либо слишком сложными для практического внедрения в реальные производственные системы [5, 13-15]. До сих пор отсутствует единая универсальная модель, сочетающая прозрачность физического подхода и адаптивность современных интеллектуальных методов, что затрудняет внедрение таких решений в системы структурного мониторинга [16, 17].

Таким образом, возникает необходимость разработки гибридного подхода, сочетающего простоту и интерпретируемость физических моделей (традиционные *S-N*-кривые, основанные на эмпирических или механистических зависимостях, таких как степенной закон Баскина) с возможностями нейросетевых алгоритмов. Решение этой задачи позволит повысить надёжность прогнозирования усталостного ресурса восстановленных сварных соединений и существенно снизить риск возникновения аварий на опасных производственных объектах [1, 18].

Разработка предлагаемой в настоящей работе комбинированной физико-нейросетевой модели направлена на повышение точности прогнозов остаточного ресурса сварных конструкций морских платформ и других опасных производственных объектов. Практическим результатом является возможность интеграции модели в системы мониторинга состояния конструкций, что позволит своевременно выявлять потенциально опасные участки, планировать превентивные ремонты и, как следствие, минимизировать риск для персонала [19, 20].

Цель исследования – разработать и проверить эффективность гибридной физико-нейросетевой модели для оценки усталостной долговечности

восстановленных сварных соединений с учётом реальных эксплуатационных факторов, обеспечив при этом прозрачность и возможность аналитического использования.

Методология. В настоящей работе проведена обработка результатов экспериментальных исследований усталостной долговечности сварных соединений, восстановленных с применением четырёх различных технологий ремонта. Целью являлась сравнительная оценка эффективности этих методик на основании данных о числе циклов до разрушения при заданных уровнях напряжения, а также разработка универсального подхода к прогнозированию ресурса конструкций с использованием гибридной физико-нейросетевой модели.

В работе были рассмотрены четыре типовые технологии ремонта, применяемые для восстановления сварных соединений элементов морских платформ [13]. Исследованы: тавровое соединение, в котором устранение трещины осуществлялось путём высверливания трещиноуловителей, зачистки дефектной зоны и последующей заварки; соединение типа «раскос», моделирующее характерный узел морской платформы, где восстановление также выполнялось с использованием трещиноуловителей; соединение с металлической вставкой, при котором повреждённая область полностью вырезалась и заменялась накладкой, ввариваемой с предварительным подогревом и поэтапной сваркой; а также соединение, восстановленное по технологии, разработанной на месторождении «Белый Тигр»[9], где применялась предварительная наплавка буферного аустенитного слоя с последующей сваркой основного металла в условиях интенсивного охлаждения. Для всех четырёх конструкций были проведены циклические испытания, результаты которых легли в основу последующего анализа и построения моделей усталостной долговечности.

В рамках большинства инженерных методик оценка усталостной долговечности сварных соединений осуществляется на основе упрощённых предположений о форме *S-N* кривой. Так, классическая зависимость Баскина [5, 11] записывается в виде:

$$\Delta\sigma \cdot N^{1/m} = C \qquad (1)$$

где $\Delta\sigma = \sigma_a - \sigma_R$ «чистая» амплитуда напряжения над условным усталостным пределом σ_R, m – показатель крутизны кривой, C – константа усталостной прочности, N – число циклов до разрушения. Для удобства и без заметной потери точности в области высокоцикловой усталости принимают $\sigma_R = 0$ (то есть $\Delta\sigma = \sigma_a$) и $m = 2$, что сводит модель к виду

$$\sigma_a = C \cdot N^{-1/2} \qquad (2)$$

В частности, при таком допущении получаются следующие выражения для оценки предела выносливости по формулам [3] Д.И. Гольцева – $\sigma_R(G)$ и В.Н. Пантелеева – $\sigma_R(P)$

$$\sigma_{R(G)} = \sqrt[2]{\frac{\sigma_1^2 N_1 - \sigma_2^2 N_2}{N_1 - N_2}},$$

$$\sigma_{R(P)} = \sqrt[2]{\frac{(N_2 - N_1)\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_1^2 N_2 - \sigma_2^2 N_1}} \qquad (3)$$

соответственно. Подобные формулы удобны для быстрых ручных расчётов, но принципиально не учитывают фактический показатель крутизны кривой m, зависящий от материала и технологии ремонта.

При наличии экспериментальных данных более точное значение m и коэффициентов модели можно найти методом наименьших квадратов, решая задачу

$$min_{m,C} \sum_{i=1}^{K} \left(\ln \sigma_{a,i} - \left(\ln C - \frac{1}{m} \cdot \ln N_i \right) \right)^2 \qquad (4)$$

Этот подход легко реализуется в интерактивных вычислительных средах (например, «*Jupyter Notebook*») и позволяет получить индивидуальную *S-N* зависимость для каждого набора данных.

Альтернативно, без привязки к конкретной физической модели, можно непосредственно аппроксимировать экспериментальные точки логарифмическими полиномами или сплайнами

$$\ln \sigma_a \approx a_0 + a_1 \ln N + a_2 (\ln N)^2 + \cdots \qquad (5)$$

– однако такие эмпирические зависимости часто оказываются слабо обобщаемыми и трудно интерпретируемыми.

Наиболее гибкий и адаптивный подход заключается в модификации классической зависимости Баскина путём введения дополнительного корректирующего члена $R(\ln N)$, реализованного в виде обучаемой нейросети (многослойного перцептрона, *MLP*). В гибридной форме модель записывается следующим образом:

$$\ln \sigma_a = \ln C - \frac{1}{m} \ln N + R(\ln N) \qquad (6)$$

где первые два члена $\ln C - \frac{1}{m} \ln N$ соответствуют традиционной аппроксимации типа *S-N*, а функция $R(\ln N)$ служит корректирующим дополнением. Она обучается на основе разности между экспериментальными значениями напряжения и теоретическими предсказаниями физической модели. Это позволяет адаптировать модель к конкретным технологическим условиям, учесть влияние остаточных напряжений, конструктивных особенностей и других факторов, не отражённых в исходной зависимости. После обучения функция может быть представлена в виде полинома для удобства аналитического использования.

Такой физико-нейросетевой метод сохраняет интерпретируемость базовой модели и одновременно подстраивается под реальные технологические и эксплуатационные особенности сварных соединений [7].

Результаты. В ходе работы для каждой из четырёх ремонтных технологий были построены две базовые модели усталостной выносливости. Первая – аддитивная логарифмическая модель, имеющая вид:

$$\sigma_a = \sigma_u + \sigma_c \cdot \ln N \qquad (7)$$

где σ_u соответствует условному усталостному пределу (свободный член), а σ_c определяет наклон прямой и показывает, на сколько МПа изменяется амплитуда напряжений при увеличении $\ln N$ на единицу. Параметры σ_u и σ_c определялись методом наименьших квадратов в системе координат ($x = \ln N$, $y = \sigma_a$). Эта модель обеспечивает простую и наглядную аппроксимацию в полулинейной шкале.

Вторая – физически обоснованная степенная *S-N* зависимость Баскина [6],

$$\sigma_a = C \cdot N^{-1/m} \quad (8)$$

где C – константа усталостной прочности, а m – показатель крутизны, определяющий наклон усталостной кривой в логарифмическом масштабе.

По имеющимся экспериментальным данным были вычислены коэффициенты данных моделей, что позволило количественно сравнить поведение различных ремонтных технологий (табл. 1). Отметим, что наименьшее значение m наблюдается у первой технологии ремонта (тавровое соединение), что указывает на более пологий спад амплитуды при росте числа циклов и может свидетельствовать о повышенной усталостной устойчивости данного типа соединения.

Таблица 1 – Параметры S-N зависимости Баскина и аддитивной модели усталостной выносливости для разных технологий ремонта

Метод ремонта	$\sigma_и$	σ_c	m	C
1	198,6858	-12,8078	3,753273	977,0625
2	218,5703	-13,5056	4,199414	837,4622
3	238,3359	-13,5674	3,804272	1712,209
4	228,2637	-12,4233	4,142536	1422,918

Сравнение параметра m между различными технологиями позволяет сделать вывод о степени снижения усталостной выносливости: более низкое значение m соответствует более пологой кривой и, следовательно, потенциально более эффективной технологии ремонта. Для всех четырёх методов были также построены графики (рис. 1), на которых показано поведение как аддитивной модели, так и *S-N* зависимости Баскина по отношению к экспериментальным точкам.

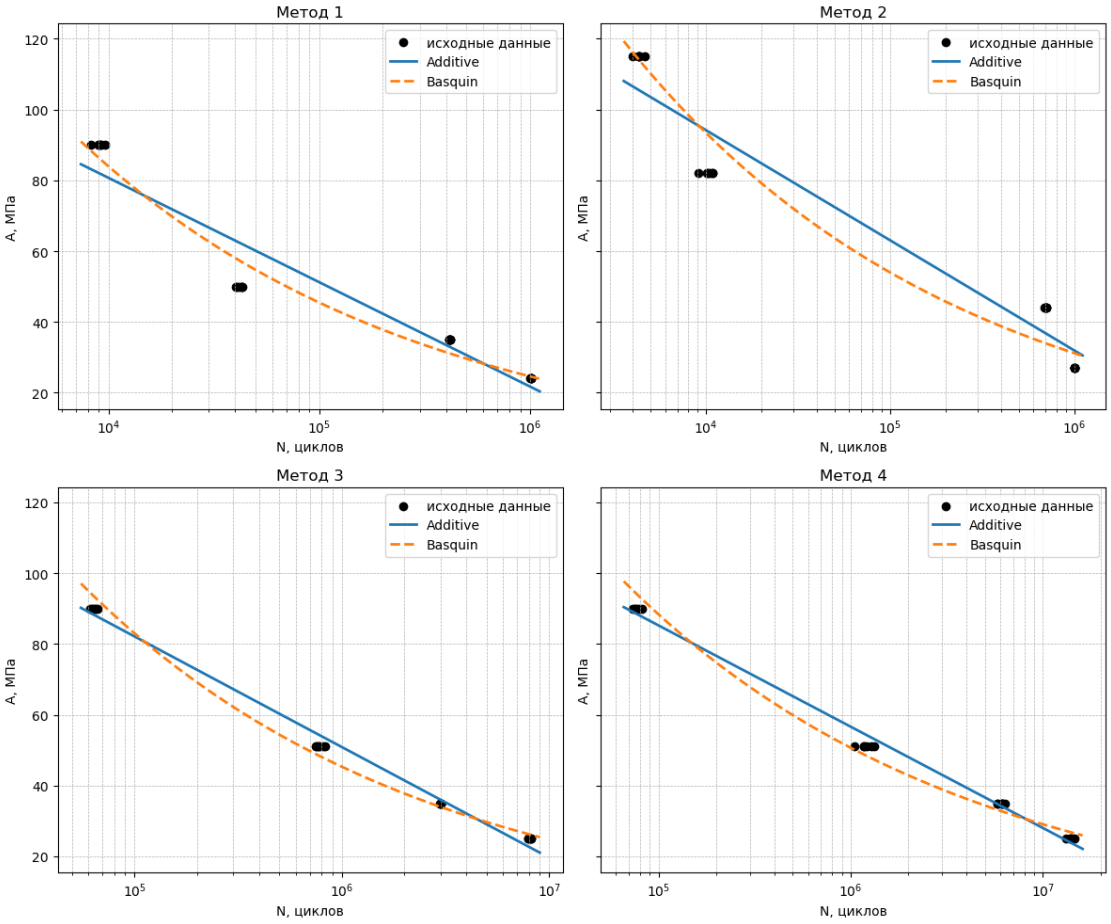


Рисунок 1 – (S-N)-кривые для ремонтных технологий 1–4: аддитивная регрессия и модель Баскина

Далее была рассмотрена гибридная модель, в которую введено нейросетевое корректирующее слагаемое $R_\theta(\ln N)$. Параметры *S-N* зависимости Баскина (m, C) были зафиксированы, а $R_\theta(\ln N)$ обучался как выход небольшой *MLP*-сети (два скрытых слоя по 16 нейронов, *ReLU*). Для каждой ремонтной технологии на основе экспериментальных *CSV*-таблиц (амплитуда напряжений *vs.* число

циклов) в «*Jupyter Notebook*» была реализована адаптивная нейронная сеть: на её вход подавался единичный признак $u_i = \ln N_i$, а выходной нейрон формировал поправку $R_\theta(u_i)$. Таким образом, сеть имела один вход, два скрытых слоя и один выход, без *one-hot* кодирования, и обучалась отдельно для каждого метода ремонта.

Оптимизацию всех параметров проводили путём минимизации регуляризованной *MSE* (*mean squared error* – среднеквадратичная ошибка) в лог-пространстве [12]:

$$\mathcal{L}(\theta, m, C) = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\left[ln\Delta\sigma_i + \frac{1}{m}lnN_i - lnC - R_\theta(u_i)\right]^2 + \lambda\|\theta\|^2 \quad (9)$$

где $\|\theta\|^2 = \sum_{j=1}^{P}\theta_j^2$ – квадрат евклидовой нормы всех P параметров сети, то есть всех весов и смещений (*bias*) во всех слоях *MLP*.

В результате получена обобщённая *S-N*-кривая

$$\sigma_a = CN^{-1/m}\cdot\exp(R_\theta(\ln N)) \quad (10)$$

Для оперативности расчётов функцию $R(\ln N)$ дополнительно аппроксимировали кубическим полиномом

$$R(\ln N) \approx a_0 + a_1\ln N + a_2(\ln N)^2 + a_3(\ln N)^3 \quad (11)$$

Тогда, полученную модель можно записать следующим образом:

$$\sigma_a = CN^{-1/m}\cdot\exp(R(a_0 + a_1\ln N + a_2(\ln N)^2 + a_3(\ln N)^3) \quad (12)$$

коэффициенты полученного полинома представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты полиномиальной аппроксимации $R(\ln N)$ для различных методов ремонта

	α_1	α_2	α_3	α_4
1 метод	30.317	-8.0057	0.6949	-0.0199
2 метод	27.0566	-7.7286	0.7213	-0.0220
3 метод	2.2325	-0.7214	0.0702	-0.0021
4 метод	13.6455	-3.2261	0.2505	-0.0064

Сопоставление кривых на графике показывает, что предложенный полином третьей степени достаточно точно повторяет поведение нейросетевого корректирующего слагаемого $R(\ln N)$ (рис. 2).

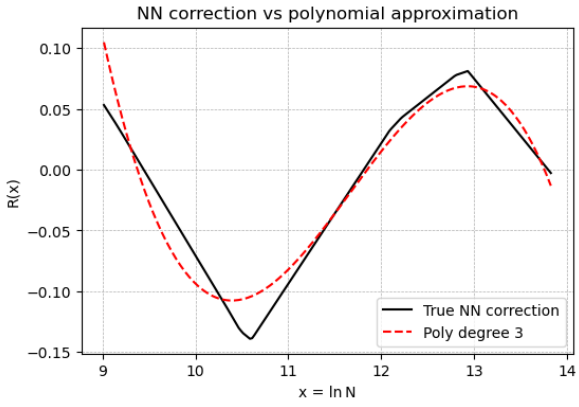


Рисунок 2 – Сравнение корректирующего слагаемого R(ln N) и его полиномиальной аппроксимации

Обсуждение. Результаты проведённого исследования имеют непосредственное значение для обеспечения безопасности труда при эксплуатации морских нефтегазовых платформ. Анализ трёх подходов – классической зависимости Баскина, гибридной нейросетевой модели и её полиномиальной аппроксимации – показал, что именно гибридная модель наилучшим образом соотносится с экспериментальными данными, что критически важно для надёжной и безопасной эксплуатации морских объектов.

Сравнительный график (рис. 3) наглядно иллюстрирует различия между классической моделью *S-N* зависимости Баскина и двумя вариантами гибридной модели – с нейросетевым корректирующим слагаемым и его полиномиальной аппроксимацией. Видно, что базовая степенная кривая лишь частично совпадает с экспериментальными точками, тогда как обе гибридные модели демонстрируют высокую степень соответствия данным по всей области циклов. Это особенно важно для оценки надёжности в диапазоне высокоцикловой усталости, характерной для длительной эксплуатации морских сооружений. При этом полиномиальная модель практически не уступает нейросетевой по точности, обеспечивая удобство аналитических расчётов при сохранении адаптивности, что делает её эффективным инструментом в задачах промышленной диагностики.

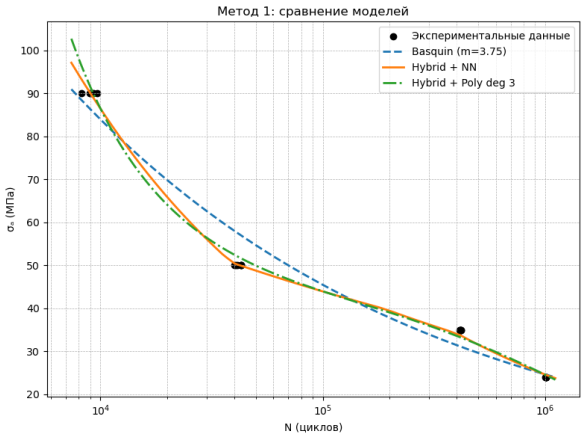


Рисунок 3 – Сравнение чистой S–N зависимости Баскина и гибридных моделей (NN и полиномиальной степени 3)

При наличии структурированных данных о параметрах сварных соединений возможна быстрая адаптация модели под конкретный узел за счёт повторного обучения корректирующего члена $R(\ln N)$. На практике такие данные могут поступать в виде таблиц *CSV* с амплитудами переменных напряжений, числом циклов до разрушения и технологическими характеристиками шва, выгружаемых с производственного объекта. Это позволяет формировать индивидуальные *S-N*-кривые и выполнять оперативный прогноз остаточного ресурса с учётом условий эксплуатации. При этом следует отметить, что при увеличении объёма доступных данных нейросетевая модель

обладает большей аппроксимирующей гибкостью по сравнению с полиномиальной и способна точнее учитывать скрытые нелинейные закономерности.

Сравнение методов (табл. 3) показало, что гибридный подход позволяет снизить среднюю ошибку прогноза до 2,3%, в то время как классическая модель демонстрирует более чем четырёхкратное превышение этой погрешности. Для верификации мы сопоставили рассчитанные моделью числа циклов до разрушения с фактическими результатами натурных и лабораторных испытаний – при этом расхождение прогноза и эксперимента в каждом случае не превышало 2,3%, а случайная флуктуация данных оставалась ниже 0,1%. Это подтверждает справедливость вывода о необходимости перехода от традиционных моделей к адаптивным системам, способным учитывать реальные эксплуатационные отклонения. С инженерной точки зрения полученные результаты обеспечивают более точное прогнозирование момента разрушения и позволяют проводить регламентные ремонты заблаговременно, минимизируя риск аварий.

Таблица 3 – Основные метрики качества

Метрика	S-N зависимость Баскина	Гибридная модель (NN)	Гибридная модель (полином)
(корень из среднеквадратичной процентной ошибки)	9,5676%	2,3413%	2,6497%
(средняя абсолютная процентная ошибка)	8,0966%	1,9009%	2,1577%
(Коэффициент детерминации, R-squared)	0,9659	0,9980	0,9962

По сравнению с аналогичными публикациями [8, 7, 12], в которых также использовались нейросетевые методы, данная работа отличается тем, что сохранена физическая интерпретируемость базовой модели. Это особенно важно в прикладных задачах охраны труда, где прозрачность расчётов может быть необходима при расследовании инцидентов или в обосновании ремонтных решений.

Кроме того, предложенная методика позволяет оценить влияние конкретных ремонтных технологий на остаточный ресурс сварных соединений. Так, было показано, что наилучшие параметры усталостной выносливости продемонстрировала первая технология ремонта (тавровое соединение), характеризующаяся более пологим спадом напряжений и повышенной устойчивостью к циклическим нагрузкам. Эти данные могут быть учтены при выборе наиболее эффективной ремонтной стратегии. Подобный анализ повышает обоснованность управленческих решений в области промышленной и трудовой безопасности.

Немаловажно, что разработанная модель может быть интегрирована в систему мониторинга состояния конструкций. На основе реальных данных с платформ (напряжения, количество циклов) можно в режиме реального времени пересчитывать ожидаемый остаточный ресурс. Это позволяет не просто фиксировать факт приближения к критическому состоянию, но и прогнозировать его с упреждением, что существенно снижает вероятность травматизма и катастроф.

Таким образом, в контексте задач обеспечения безопасности труда, полученные результаты представляют собой шаг к созданию предиктивных моделей техсостояния, позволяющих сократить число незапланированных ремонтов, повысить надёжность оборудования и снизить нагрузку на персонал за счёт перехода от реактивного к профилактическому управлению рисками.

Выводы. В результате проведённого исследования была разработана и апробирована гибридная физико-нейросетевая модель для описания зависимости амплитуды переменных напряжений σ_a от числа циклов до разрушения N в сварных соединениях морских платформ, восстановленных различными методами ремонта. Комбинация классической S-N зависимости Баскина с обучаемым корректирующим членом и его полиномиальной аппроксимацией позволила снизить среднюю погрешность прогноза остаточного ресурса до 2,3% при коэффициенте детерминации выше 0,99.

Разработанный подход обеспечивает как физическую интерпретируемость результатов, так и высокую точность прогнозирования, что делает его удобным для применения в инженерной практике. Проведённый сравнительный анализ четырёх ремонтных технологий показал, что модель позволяет количественно оценивать влияние выбранной технологии ремонта на усталостную выносливость соединения.

Предложенная методика обеспечивает более точный расчёт остаточного ресурса за счёт адаптации модели к фактическим условиям эксплуатации конкретного объекта, что повышает обоснованность инженерных решений при планировании технических мероприятий. Такой подход не только способствует повышению общей надёжности эксплуатации, но и напрямую влияет на уровень охраны труда — снижая производственные риски и обеспечивая безопасность персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Mirzaei A. M. Stress, strain, or energy? Which one is superior predictor of fatigue life in notched components? A novel machine learning-based framework // Engineering Fracture Mechanics. – 2024. – Vol. 309. – Article 110401. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2024.110401.

2. Клыков Н.А. Усталостная прочность сварных соединений конструкционных сталей и методы ее расчетной оценки: автореф. дис. … д-ра техн. наук. – М.: 1978. – 32 с.

3. Труфяков В.Я. Усталость сварных соединений. – Киев: Наук. думка, 1973. – 216 с.

4. Матохин Г.В., Воробьёв А.Ю., Игуменов А.А. Расчетная оценка пределов выносливости сталей в зоне концентратора напряжений // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – № 2. – С. 1-5.

5. Никитин И.С., Бураго Н.Г., Никитин А.Д., Якушев В.Л.

Определение критической плоскости и оценка усталостной долговечности при различных режимах циклического нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Механика. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2017. – № 4. – С. 238-252. – УДК 539.3. – DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.15.

6. Murakami Y., Takagi T., Wada K., Matsunaga H. Essential structure of S-N curve: Prediction of fatigue life and fatigue limit of defective materials and nature of scatter // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 146. – Article 106138.– DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106138. – ISSN 0142-1123.

7. Srinivasan D.V., Moradi M., Komninos P., Zarouchas D., Vassilopoulos A.P. A generalized machine learning framework to estimate fatigue life across materials with minimal data // Materials & Design. – 2024. – Vol. 246. – Article 113355.– DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113355. – ISSN 0264-1275.

8. Zhou H., Henrich M., Wei Z., Feng F., Yang B., Münstermann S. A general physics-informed neural network framework for fatigue life prediction of metallic materials // Engineering Fracture Mechanics. – 2025. – Vol. 322. – Article 111136. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2025.111136. – ISSN 0013-7944.

9. Литвин И.Е., Староконь И.В., Шишкин С.В. Применение регрессионных статистических моделей и метода конечных элементов для решения задач надежности теплоизолированных труб // Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2011. – № 4. – С. 146-153.

10. Kepka M., Kepka Jr M. Extending the fatigue performance of new and repaired welded T-specimens using High Frequency Mechanical Impact // International Journal of Fatigue. – 2025. – Vol. 200. – Article 109081. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2025.109081.

11. Никитин И.С., Никитин А.Д., Стратула Б.А. Комплексное исследование зарождения и роста усталостных трещин при сверхмногоцикловом кручении // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26. – № 3. – С. 50-61. – УДК 539.3. – DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_3_50

12. Arvanitis K., Nikolakopoulos P., Pavlou D., Farmanbar M. Machine learning-based fatigue lifetime prediction of structural steels // Alexandria Engineering Journal. – 2025. – Vol. 125. – P. 55-66.– DOI: 10.1016/j.aej.2025.04.014.

13. Гранев В.В., Фролов Ю.В., Ильин В.Т. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений – М.: ЦНИИпромзданий, 1997. – 180 с.

14. Давыдов Е.Ю. Проектирование ферм из круглых и прямоугольных труб / Издательство БГПА, 2000. – 128 с.

15. Echerraidi I., Weisz-Patrault D., Peigney M. Fast mesoscopic model of plasticity in polycrystals to compute probabilistic S–N curves in high cycle fatigue // International Journal of Solids and Structures. – 2025. – Vol. 315. – Article 113348. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2025.113348.

16. Kohout J., Vechet S. Shift of S–N curves in some fatigue models due to loading cycle asymmetry // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – Article e26306. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26306.

17. He L., Tian Y., Akebono H., Sugeta A. Prediction of fatigue crack propagation behavior in elastic–plastic region under block loading for type 316 steel via artificial neural network approach // International Journal of Fatigue. – 2025. – Vol. 192. – Article 108725. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108725.

18. Pan Y., Sharif Khodaei Z., Aliabadi F.M.H. In-service fatigue crack monitoring through baseline-free automated detection and physics-informed neural network quantification // NDT & E International. – 2025. – Vol. 153. – P. 103360. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2025.103360.

19. Giannella V., Bardozzo F., Postiglione A., Tagliaferri R., Sepe R., Armentani E. Neural networks for fatigue crack propagation predictions in real-time under uncertainty // Computers and Structures. – 2023. – Vol. 288. – P. 107157. – DOI: 10.1016/j.compstruc.2023.107157.

20. Wang M., Inceceik A., Tian Z., Zhang M., Kujala P., Gupta M., Kroliczyk G., Li Z. Structural health monitoring on offshore jacket platforms using a novel ensemble deep learning model // Ocean Engineering. – 2024. – Vol. 301. – P. 117510. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117510.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.84:621.313.3
EDN: CLVMTV

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ЗНАЧЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ФАЗНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 6730-2607
AuthorID: 270797
ORCID: 0000-0001-7493-6803
ResearcherID: AAO-4611-2021
ScopusID: 56974096100

БАШИРОВ Мусса Гумерович, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий»
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(453250, г. Салават, ул. Губкина, д. 22 Б, Башкортостан, Россия, e-mail: eapp@yandex.ru)

SPIN: 8947-8702
AuthorID: 1197222
ORCID: 0009-0002-2628-5975
ResearcherID: NZN-8338-2025

ДЮЛЬДИН Никита Денисович, аспирант кафедры «Пожарная безопасность»
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(450044, Россия, Уфа, улица Матвея Пинского, дом 4, e-mail: hukutko2014@gmail.com)

Аннотация. В статье рассматривается проблема определения уровня пожарной опасности синхронных электрических машин переменного тока на основе анализа параметров гармонических составляющих фазных токов и напряжений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования пожарной безопасности на объектах энергетики и нефтегазового комплекса, где синхронные машины используются как в составе генераторных установок, так и в электроприводах насосного и компрессорного оборудования. За период 2015-2024 гг. зафиксировано 37 случаев возгораний, вызванных дефектами обмоток и перегревом подшипников синхронных электрических машин. В Федеральном законе от 22.07.2008 №123-ФЗ, а также в методических рекомендациях и стандартах МЧС России даются определения ключевых понятий оценки пожарной опасности электрооборудования. Эти понятия объединяют системные характеристики вероятности возникновения и развития пожара, обусловленные совокупностью аварийных режимов, термических процессов и электрических аномалий в работе оборудования, с учетом нормативных критериев безопасности. Тремя основными факторами возникновения пожара являются – источник воспламенения, горючее вещество и окислитель. Устранение одного из условий, обеспечивающих возможность возникновения и распространения горения, исключает реализацию пожароопасной ситуации, в том числе и в процессе эксплуатации синхронных электрических машин. Разработан метод, основанный на электромагнитном спектральном анализе и применении интегрального критерия, отражающего уровень пожарной опасности, позволяющий на ранних стадиях идентифицировать дефекты, формирующие потенциальные источники воспламенения, и принимать меры по их устранению. Разработан интегральный диагностический критерий пожарной опасности синхронных электрических машин, основанный на комплексном анализе параметров гармонического спектра фазных токов и напряжений, температуры подшипников и состояния изоляции. Обоснована количественная связь между изменениями параметров спектра гармонических составляющих фазных токов и напряжений синхронных электрических машин и уровнем их пожарной опасности. Расширен и уточнен перечень параметров, обладающих диагностической значимостью для оценки технического состояния синхронных электрических машин применительно к задачам пожарной безопасности, подтвержденный результатами экспериментальных исследований. Практическая значимость исследования заключается в обеспечении методологической основы для разработки автоматизированных систем раннего выявления и прогнозирования уровня пожарной опасности синхронных электрических машин в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: пожарная безопасность, синхронная электрическая машина, генератор переменного тока, электромагнитный спектральный метод, интегральный критерий, предельные значения, электрические дефекты, механические дефекты, пожарная опасность, уровень пожарной опасности, оценка технического состояния.

DETERMINATION OF THE FIRE HAZARD LEVEL OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES BASED ON THE VALUES OF HARMONIC PARAMETERS, PHASE CURRENTS AND VOLTAGES

© The Author(s) 2025
BASHIROV Mussa Gumerovich, doctor of technical sciences, professor,
head the Department "Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises"
Ufa State Petroleum Technological University

(453250, Gubkin St., 22B, Salavat, Bashkortostan, Russian Federation, e-mail: eapp@yandex.ru)
DIULDIN Nikita Denisovich, post-graduate student
Ufa state petroleum technological University
(450044, Russia, Ufa, Matvey Pinsky st., 4, e-mail: hukutko2014@gmail.com)

Abstract. The article considers the problem of determining the fire hazard level of synchronous alternating current electric machines based on the analysis of the parameters of the harmonic components of phase currents and voltages. The relevance of the study is due to the need to improve fire safety at energy and oil and gas facilities, where synchronous machines are used both as part of generator sets and in electric drives of pumping and compressor equipment. For the period 2015-2024 37 cases of fires caused by winding defects and overheating of bearings of synchronous electric machines were recorded. Federal Law No. 123-FZ of July 22, 2008, as well as the methodological recommendations and standards of the Ministry of Emergency Situations of Russia define key concepts for assessing the fire hazard of electrical equipment. These concepts combine the system characteristics of the probability of occurrence and development of a fire caused by a combination of emergency modes, thermal processes and electrical anomalies in the operation of equipment, taking into account regulatory safety criteria. The three main factors of a fire are the source of ignition, the combustible substance and the oxidizer. The elimination of one of the conditions that ensure the possibility of the occurrence and spread of fire eliminates the realization of a fire-hazardous situation, including during the operation of synchronous electric machines. A method based on electromagnetic spectral analysis and the application of an integral criterion reflecting the level of fire danger has been developed, which makes it possible to identify defects forming potential sources of ignition at an early stage and take measures to eliminate them. An integral diagnostic criterion for the fire hazard of synchronous electric machines has been developed based on a comprehensive analysis of the parameters of the harmonic spectrum of phase currents and voltages, bearing temperature and insulation condition. The quantitative relationship between the changes in the parameters of the spectrum of harmonic components of phase currents and voltages of synchronous electric machines and the level of their fire danger is substantiated. The list of parameters with diagnostic significance for assessing the technical condition of synchronous electric machines in relation to fire safety tasks has been expanded and clarified, confirmed by the results of experimental studies. The practical significance of the research lies in providing a methodological basis for the development of automated systems for early detection and forecasting of the fire hazard level of synchronous electric machines during their operation.

Keywords: fire safety, synchronous electric machine, alternator, electromagnetic spectral method, integral criterion, limit values, electrical defects, mechanical defects, fire hazard, fire hazard level, technical condition assessment.

Для цитирования: *Баширов М.Г. Определение уровня пожарной опасности синхронных электрических машин по значениям параметров гармонических составляющих фазных токов и напряжений / М.Г. Баширов, Н.Д. Дюльдин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 235-245. – EDN: CLVMTV.*

Введение. Обеспечение пожарной безопасности на объектах электроэнергетики, нефтепереработки и нефтехимии является важной задачей, особенно в условиях эксплуатации электрических машин большой мощности [1]. Синхронные двигатели применяются в составе насосно-компрессорных агрегатов, а синхронные генераторы – на электростанциях различного типа. Оба вида машин относятся к категории оборудования повышенного риска пожарной опасности [2]. Пожарная безопасность синхронных машин регулируется следующими основными нормативно-правовыми документами:

– Федеральный закон №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [3];

– Правила устройства электроустановок, глава 7.4 «Электроустановки в пожароопасных зонах» [4];

– Правила противопожарного режима РФ (Постановление Правительства РФ №1479 от 16.09.2020) [5];

– ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» [6];

– ГОСТ Р 53325-2012 [7], ГОСТ 32144-2013 [8] и ГОСТ 30804.4.30-2013 [9].

В работах, посвященных исследованию поврежденности электрических машин, М.Г. Баширов [10] и Э.М. Баширова [11] подтверждают наличие закономерностей между характером повреждений и изменением параметров гармонического спектра фазных токов и напряжений асинхронных электрических машин. Однако, в этих работах отсутствует оценка уровня пожарной опасности синхронных электрических машин. Использование электромагнитного спектрального метода диагностики для определения механических и электрических дефектов турбогенераторов на объектах электроэнергетики освещает И.Г. Хуснутдинова [12]. Вопросы пожарной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса, связанные с эксплуатацией электрических машин, исследовали Hu Chen [13], Babak Omidvar [14], Congming Ma [15]. Вопросы использования инновационных технологий в противопожарной деятельности отражают работы Ja Roguski [16] и Nikolai Makhutov [17]. В исследовании автора Bogdan Kolcz [18] проанализированы нормативно-правовые положения, регулирующие деятельность предприятий повышенного риска и

пожарных служб.

Обеспечение пожарной безопасности синхронных электрических машин является условием надежной и безопасной эксплуатации технологических установок. Отсутствие контроля над их техническим состоянием может приводить к авариям, сопровождающимся пожарами и взрывами, с серьезными последствиями для людей и оборудования. К крупным авариям, связанным с неисправностями агрегатов с синхронными электрическими машинами, можно отнести аварию на Экибастузской ГРЭС-1 в 2003 году, экономический ущерб от аварии составил 2,3 млрд. рублей. Она произошла по причине разрушения лопаток турбины, это привело к воспламенению и взрыву водорода, частичному разрушению турбогенератора и выводу блока из строя на несколько месяцев. Причиной утечки водорода стало нарушение герметичности уплотнения вала турбогенератора, возникшей вследствие попадания масла в зону уплотнения. В 2002 году произошла авария на Каширской ГРЭС. Авария произошла по причине разрушения бандажного кольца ротора синхронного генератора, что привело к пожару, повлекшему за собой полное разрушение турбоагрегата. В результате этой катастрофы погибло 3 человека, прямые экономические убытки составили 300 млн. рублей, на восстановление станции затратили 1 млрд. рублей. Последствия аварии на Каширской ГРЭС продемонстрированы на рисунке 1.

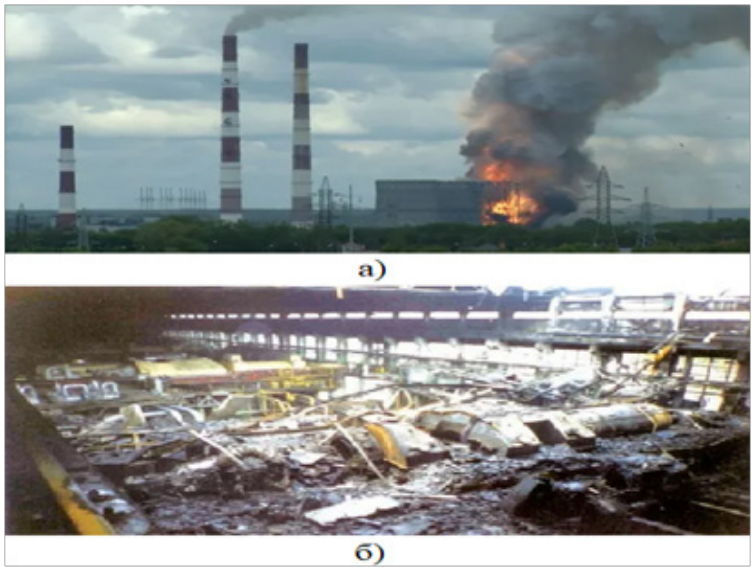


Рисунок 1 – Авария на Каширской ГРЭС: а – пожар во время аварии; б – последствия пожара

С 2015 по 2024 год возгорание синхронных двигателей по причине дефектов обмоток зафиксировано в 28 случаях, что составляет 76% от общего числа, из них межвитковое замыкание обмоток произошло в 19 случаях. Например, на компрессорной станции «Уренгойтрансгаз» в 2021 году произошло возгорание синхронного двигателя ДСК-313-24-12, что привело к ущербу в 23 млн. рублей. На предприятии ООО «Салаватнефтеоргсинтез» в 2018 году произошла утечка масла, которая привела к загрязнению обмоток статора синхронного электродвигателя компрессора, пробою изоляции и короткому замыканию с возникновением пожара. На Экибастузской ГРЭС-1 в 2017 году дисбаланс ротора синхронного двигателя вызвал перегрев подшипника и воспламенение масла. Неисправность подшипников синхронных электрических машин становилась причиной возгорания в 9 случаях. Средний ущерб на один случай возгорания составляет 15-25 млн. рублей. Крупный экономический ущерб в 89 млн. рублей принесла авария турбогенератора с возникновением пожара на Сахалинской ТЭЦ в 2022 году. В докладе МЧС РФ за 2023 год отмечается, что ранняя диагностика дефектов электрических машин сокращает экономический ущерб на 25-35%.

Для повышения уровня пожарной безопасности необходимо определить диагностические критерии, позволяющие количественно связать техническое состояние машины с риском возгорания. В этом направлении особую актуальность приобретает развитие электромагнитного спектрального анализа параметров фазных токов и напряжений синхронных электрических машин как средства для оценки их потенциальной пожарной опасности. Исследования, проведенные на кафедре «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» (ЭАПП) УГНТУ, показывают высокую информативность метода диагностики, основанного на анализе параметров спектра гармонических составляющих фазных токов и напряжений асинхронных электрических машин для определения их технического состояния. Анализ публикаций показывает, что электромагнитный спектральный метод при использовании временно-частотного представления позволяет выявлять с высокой досто-

верностью практически все виды дефектов электрических машин на ранней стадии развития [19]. Эти результаты подтверждают перспективность применения электромагнитного спектрального анализа параметров гармонических составляющих фазных токов и напряжений электрических машин для ранней диагностики их технического состояния.

Целью настоящего исследования является разработка подхода, позволяющего количественно оценивать уровень пожарной опасности синхронных электрических машин на основе анализа параметров спектра гармонических составляющих фазных токов и напряжений с использованием нейросетевых технологий и критериев, установленных нормативно-техническими документами.

Методология. Объектом исследования являются синхронные электрические машины переменного тока, применяемые в составе промышленных агрегатов, в том числе в электроприводах насосов и компрессоров, где они функционируют в условиях повышенной механической и тепловой нагрузки. В качестве репрезентативных моделей были выбраны синхронные машины ДСК-313-24-12 и СД-13-34-8, технические характеристики которых позволяют отнести их к типовым образцам оборудования, эксплуатируемого в промышленных условиях, их параметры приведены в таблице 1. Выбор данных электродвигателей обусловлен их широкой распространенностью в нефтегазовой, химической и энергетической промышленности.

Таблица 1 – Технические характеристики исследуемых синхронных машин

№ п/п	Модель синхронной машины	Мощность, кВт	Число оборотов, об/мин	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Коэффициент мощности	КПД, %
1	ДСК-313-24-12	200	500	380	368	0,9	0,91
2	СД-13-34-8	400	750	6000	46	0,9	0,92

**составлено авторами*

Измерение электрических параметров синхронных электрических машин осуществлялось с использованием многофункционального измерительного комплекса *Power Master MI* 2885 с программным обеспечением *Power View* в соответствии с ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 30804.4.30-2013 и ГОСТ 31819.21-2012 [20]. Анализу подвергались амплитуды гармонических составляющих фазных токов и напряжений по 12-ую включительно, так как согласно исследованиям кафедры ЭАПП УГНТУ, именно они являются наиболее информативными для решения задач диагностики электрических машин. Значения параметров гармоник выше 12-ой уже сопоставимы с уровнем шумов и помех в сети электроснабжения, что затрудняет их использование при оценке технического состояния электрических машин. В соответствии с ГОСТ 32144-2013 искажение синусоидальности фазных токов и напряжений синхронных электрических машин оценивалось коэффициентом *n*-ой гармонической составляющей тока $K_I(n)$ и коэффициентом *n*-ой гармонической составляющей напряжения $KU(n)$.

Для измерения углов фазового сдвига между соответствующими фазными напряжениями и токами использовалась фиксация моментов перехода их через ноль (1).

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin\left(\frac{k}{N}\omega_1 t + \varphi_k\right), \quad (1)$$

где ω_1 – угловая частота основной составляющей ($\omega_1=2\pi f_{H,1}$);

c_0 – постоянная составляющая;

c_k – амплитуда составляющей спектра с частотой $f_{C,k}=(k/N)f_{H,1}$;

k – порядковый номер спектральной составляющей;

N – число периодов основной частоты во временном интервале измерения;

φ_k – начальная фаза спектральной составляющей с порядковым номером k.

В подавляющем большинстве практических задач разложение сигнала в ряд Фурье осуществляется с использованием цифровых методов, к таким методам относится быстрое преобразование Фурье. Согласно ГОСТ Р 8.655-2009 [21] коэффициент *n*-ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ рассчитывается по формуле 2.

$$K_{U(n)} = U_{(n)} / U_{(1)} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $U_{(1)}$ – среднеквадратическое значение напряжения основной частоты;

$U_{(n)}$ – среднеквадратическое значение напряжения гармоники;

Вычисление коэффициентов искажений тока для *n*-й гармоники $K_{I(n)}$ осуществляется в соответствии с формулой 3.

$$K_{I(n)} = I_{(n)} / I_{(1)} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $I_{(1)}$ – среднеквадратическое значение тока основной частоты;

$I_{(n)}$ – среднеквадратическое значение тока гармоники.

Техническое состояние исследуемых агрегатов оценивалось исходя из отчетов ремонтных мастерских, занимавшихся восстановлением синхронных машин. Результаты исследований соответствуют требованиям технических условий ТУ 3300-010-00212788-2011ОК и нормам Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей электрической энергии.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечиваются соблюдением требований ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Методика выполнения измерений.

Результаты. Для определения уровня пожар-

ной опасности синхронных электрических машин предлагается использовать интегральный диагностический критерий [22]. Для его применения в отношении синхронных электрических машин дополнительно используется температура охлаждающей среды, которая отражает общий тепловой баланс и эффективность системы охлаждения. Так как система возбуждения синхронной машины дополнительно измеряет сопротивление изоляции, которая также влияет на уровень пожарной опасности, ее важно учитывать в интегральном критерии.

Пример коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений исправной синхронной электрической машины СД-13-34-8 изображен на рисунке 2

Рисунок 2 – Коэффициенты гармонических искажений фазных токов и напряжений исправной синхронной электрической машины СД-13-34-8

Одним из направлений в задачах диагностики и оценки технического состояния синхронных электрических машин является применение методов искусственного интеллекта, в частности нейросетевых технологий. Преимущество таких подходов заключается в способности обрабатывать многомерные входные данные, учитывать сложные нелинейные зависимости между параметрами, а также адаптироваться к особенностям различных режимов эксплуатации. В рамках настоящего исследования предложен интегральный диагностический показатель технического состояния, который отражает совокупное отклонение ключевых параметров от их нормативных или эталонных значений. Этот показатель далее сопоставляется с уровнем пожарной опасности, что в совокупности с применением нейронной сети позволяет автоматизировать классификацию состояния машины и выстроить систему предиктивного мониторинга. $K_{тех}$ – интегральный показатель технического состояния синхронной машины, рассчитываемый по формуле 4, может использоваться в качестве выходного параметра нейросети, реализующей алгоритм анализа параметров гармонического спектра фазных токов и напряжений.

$$K_{\text{тех}} = \sum_{\phi \in \{A,B,C\}} \sum_{i=1}^{n} w_i * P_i, \quad (4)$$

где $K_{тех}$ – интегральный показатель технического состояния синхронной машины;

$\phi \in \{A,B,C\}$ – фаза (A, B, C);

w_i – весовой коэффициент диагностического параметра i;

P_i – значения диагностических параметров (совокупность параметров: $K_{I(n)}$ – коэффициенты гармонических составляющих фазных токов; $K_{U(n)}$ – коэффициенты гармонических составляющих фазных напряжений; $\varphi_{I(n)}$ – начальная фаза n-ой гармонической составляющей фазного тока; $\varphi_{U(n)}$ – начальная фаза n-ой гармонической составляющей фазного напряжения);

n – номера гармонических составляющих фазных токов и напряжений.

Количественная связь между техническим состоянием синхронной машины и ее уровнем пожарной опасности проявляется через диагностические параметры, отражающие наличие электрических и механических дефектов, изменение температурного режима, состояние изоляции и подшипников, вызывающих искажение гармонического спектра фазных токов и напряжений. Электрические и механические дефекты, нарушения температурного режима, вызванные неисправностями изоляции и подшипников, прямо влияют на вероятность возникновения аварийных ситуаций с пожароопасными последствиями. Интегральный диагностический критерий пожарной опасности $D_{\sum}$ рассчитывается по выражению (5).

$$D_{\sum} = f(K_{тех}, T_{обм}, T_{пш}, T_{ос}, R_{из}, C_{вэб}, K_{знач}), \quad (5)$$

где f – функция, реализуемая нейронной сетью;

$K_{тех}$ – интегральный показатель технического состояния;

$T_{обм}$, $T_{пш}$ – температуры обмотки и подшипников;

$T_{ос}$ – температура окружающей среды;

$R_{из}$ – сопротивление изоляции;

$C_{вэб}$ – колебания в системе возбуждения синхронной машины (величины флуктуации тока и напряжения возбуждения);

$K_{знач}$ – коэффициент значимости пожарной опасности синхронной машины (на основе статистики пожаров).

В выражении (5) риск возникновения пожара описывается как функция от совокупности параметров, включающих динамику гармонических искажений, температуры обмотки и подшипников, температуры окружающей среды, сопротивления изоляции, колебаний в системе возбуждения, а также значимости пожарной опасности синхронной машины. Для повышения точности на данном этапе целесообразно ограничиться анализом непосредственно синхронной электрической машины, без учета специфики агрегатов, в состав которых она может входить, поскольку конструктивные и тепловые особенности таких агрегатов могут существенно отличаться.

Внешние условия, такие как: категория помещения в отношении пожарной опасности, вентиляция и т. д., формируют фоновые условия пожара, но инициирование возгорания в большинстве случаев обусловлено дефектами электрической машины, т. е. ее техническим состоянием. Источник зажигания в большинстве аварийных случаев находится внутри синхронной электрической машины. Например, пробой изоляции в обмотках синхронных электрических машин представляет собой один из наиболее опасных видов отказов. В результате пробоя между витками или фазами происходит возникновение электрической дуги, сопровождающееся локальным искрением и резким ростом температуры. При наличии горючих загрязнений или старения лакового покрытия вблизи очага дуги возможно воспламенение изоляционного материала. Электрическая дуга, как правило, развивается в ограниченном объеме пространства обмотки, создавая интенсивный нагрев с температурой до 3000˚С, что способствует термической деградации и воспламенению конструкционных материалов. Локальное короткое замыкание вызывает лавинообразное повышение тока в поврежденной зоне, что дополнительно ускоряет разрушение изоляции и может привести к возгоранию всей секции обмотки или подшипникового узла при передаче тепла. Таким образом, пробой изоляции является не только электрическим, но и термическим триггером для начала пожара внутри синхронной машины. Согласно ГОСТ 12.1.004-91, одним из факторов, определяющих пожарную опасность, является надежность функционирования электротехнического изделия в условиях эксплуатации, т. е. его техническое состояние.

Исследования выявили корреляцию между техническим состоянием синхронных машин и пожарной опасностью. Зависимость температуры и уровня пожарной опасности от степени повреждения синхронной электрической машины ДСК-313-24-12 при межвитковом замыкании статора показана в таблице 2. При межвитковом замыкании статора синхронной электрической машины температура отдельных секций статора повышается на 10-25˚С уже при начальной стадии развития дефекта [23].

Пример изменения коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений синхронной машины ДСК-313-24-12 при межвитковом замыкании обмотки статора продемонстрирован на рисунке 3.

При межвитковом замыкании амплитуда 3-й гармоники тока возрастает в 2-5 раз. Рост амплитуды происходит в той фазе, в которой произошло витковое замыкание.

Таблица 2 – Количественная зависимость температуры и уровня пожарной опасности от степени повреждения синхронной электрической машины ДСК-313-24-12 при межвитковом замыкании статора

№	Доля замкнутых витков (%)	Прирост температуры (˚С)	D_{Σ}
1	1	+10 ˚С	0,25
2	3	+15 ˚С	0,35
3	5	+20 ˚С	0,45
4	8	+25 ˚С	0,60
5	≥10	+30 ˚С и выше	≥0,75

**составлено авторами*

При неисправности подшипников синхронных электрических машин наблюдается локальное повышение температуры, обусловленное увеличением трения и механических потерь. Согласно ГОСТ 12.1.044-2018, допустимая температура подшипников составляет 80-100˚С. Перегрев подшипников сопровождается ростом амплитуд гармонических составляющих фазных токов и напряжений из-за ухудшения симметрии токов и перегрева. Пример изменения коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений при механическом износе подшипника синхронной электрической машины СД-13-34-8 показан на рисунке 4.

На начальной стадии износа подшипников (в пределах 5-10%) фиксируется повышение температуры на 10-20˚С вследствие увеличения трения. По мере прогрессирования дефекта температурный прирост может превышать 30-35˚С [24], что сопровождается ростом вибраций и локальным перегревом в зоне подшипникового узла.

Прирост температуры напрямую отражается на состоянии масла и изоляции. При износе подшипника до 20% наблюдается интенсивный рост температуры вследствие повышенного трения. По мере дальнейшего разрушения происходит тепловое насыщение: смазка выгорает, металл расширяется и эффективность теплопередачи увеличивается, что замедляет дальнейшее повышение температуры.

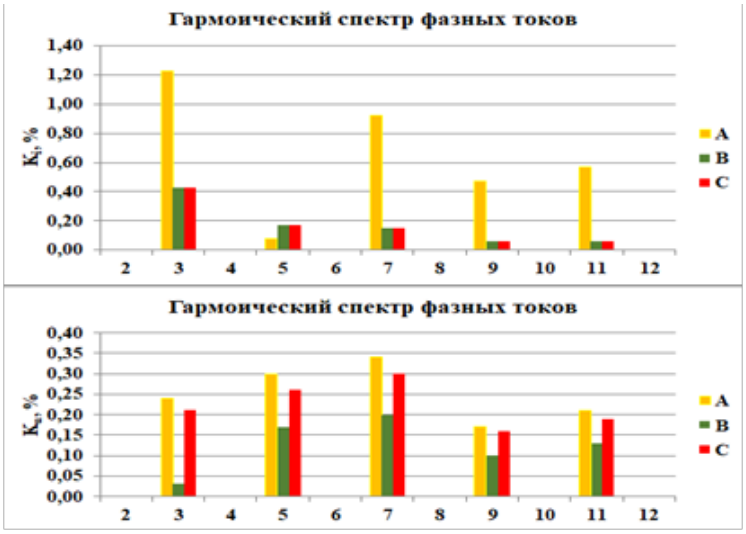


Рисунок 3 – Изменения коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений при межвитковом замыкании фазы А статора синхронной электрической машины ДСК-313-24-12

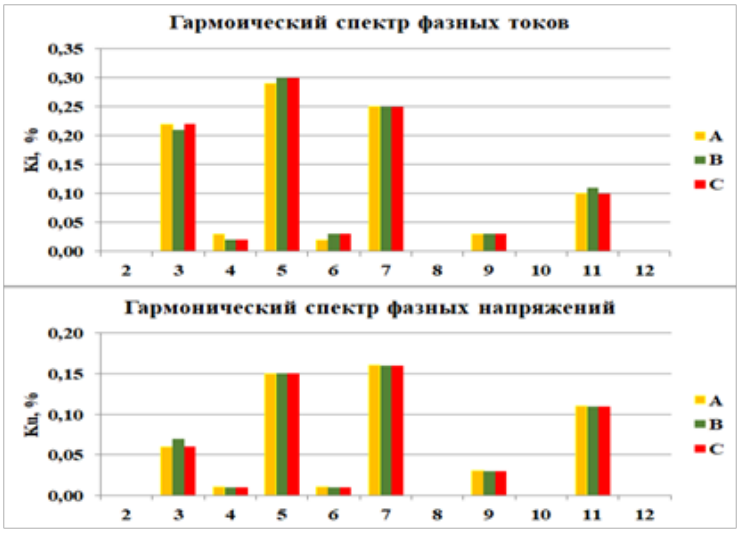


Рисунок 4 – Изменения коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений при износе подшипника синхронной электрической машины СД-13-34-8 на 10%

Количественная зависимость температуры и уровня пожарной опасности от степени повреждения подшипника отражена в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость температуры и уровня пожарной опасности от степени повреждения подшипника синхронной электрической машины СД-13-34-8

№	Износ (%)	Прирост температуры (˚С)	D_{Σ}
1	5	+10 ˚С	0,25
2	10	+20 ˚С	0,45
3	15	+30 ˚С	0,65
4	≥20	+40 ˚С и выше	0,75

**составлено авторами*

Согласно результатам исследований, проведенных Барковым С.Г. [25], нарушение соосности ротора и статора приводит к периодическому изменению величины воздушного зазора, что сопровождается появлением периодических колебаний магнитного сопротивления. Это вызывает изменение параметров гармонических составляющих фазных токов и напряжений на частотах, кратных удвоенной частоте вращения. Повреждение подшипников, эксцентриситет или механическая деформация приводят к нарушению равномерности магнитного зазора, что приводит к асимметрии магнитного поля. В условиях переменного магнитного сопротивления индуцируется дополнительная пульсация электромагнитных усилий, вызывающая возрастание параметров нечетных гармонических составляющих фазных токов и напряжений, преимущественно 3-й, 5-й и 7-й. Эти параметры отражают механическую неустойчивость вращающего элемента, включая отклонение центра масс, вибрацию и расцентровку. На рисунке 5 представлен пример изменения коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений при радиальной несоосности вала синхронной машины СД-13-34-8, составляющей 0,5 мм. Несоосность вызвала рост 2-й гармоники тока,

это является характерным признаком осевого или радиального дефекта.

Радиальная несоосность синхронной электрической машины СД-13-34-8 на 1 мм приводит к росту температуры соединения вала на 20-30˚С [26]. При радиальной несоосности от 2 мм начинается вибрация и трение в подшипниках, вызванные перекосом вала, еще больше усиливая нагрев. Таблица 4 отражает количественную зависимость температуры и уровня пожарной опасности от несоосности вала синхронных электрических машин.

Таблица 4 – Зависимость температуры и уровня пожарной опасности от радиальной несоосности вала синхронной машины СД-13-34-8

№	Несоосность (мм/%)	Прирост температуры (˚С)	D_{Σ}
1	0,5 мм / ~ 2%	+10 ˚С	0,25
2	1 мм / ~ 4%	+25 ˚С	0,45
3	2 мм / ~ 8%	+35 ˚С	0,65
4	≥3 мм / ≥ 10%	+40˚С и выше	0,75

**составлено авторами*

Рисунок 5 – Изменения коэффициентов гармонических искажений фазных токов и напряжений при радиальной несоосности вала синхронной машины СД-13-34-8, составляющей 0,5 мм

Обсуждение. Полученные результаты исследования демонстрируют возможность применения электромагнитного спектрального анализа и интегрального критерия пожарной опасности для количественной оценки уровня пожарной опасности синхронных электрических машин. Параметры гармонического спектра фазных токов и напряжений чувствительны к начальным стадиям развития электрических и механических дефектов. Как показали исследования, наиболее информативными являются гармонические составляющие фазных токов и напряжений до 12-го порядка, что согласуется с данными Прахова И.В. [27]. В частности, при межвитковом замыкании возрастает амплитуда 3-й гармонической составляющей тока, а при нарушении радиальной соосности наблюдается рост 2-й гармонической составляющей, как показано на рисунках 3 и 5. Эти количественные изменения позволяют идентифицировать тип дефекта и оценить его влияние на уровень пожарной опасности синхронных электрических машин. В качестве дополнительной диагностической информации используются углы фазового сдвига между соответствующими гармоническими составляющими фазных токов и напряжений.

Температурные параметры – температура подшипников, изоляции обмоток и охлаждающей среды – играют важную роль в контексте пожарной безопасности. Согласно ГОСТ 12.1.044-2018, превышение установленных предельных значений температуры повышает риск воспламенения. Исследования показали, что уже при 1% замкнутых витков и 5% износа подшипника прирост температуры может составлять 10-25˚С, что соответствует росту интегрального показателя пожарной опасности до уровня 0,25-0,45 (табл. 2 и 3). Согласно ГОСТ Р МЭК 60085-2010 и ГОСТ 12.1.044-2018, температура изоляции обмотки класса *F* не должна превышать 155˚С в рабочем режиме, а риск возгорания появляется при достижении 230-250˚С, что подтверждается данными по самовозгоранию органических материалов, используемых в обмотках. Для подшипников с консистентной смазкой критическим является диапазон 100-120˚С, при превышении которого разрушается смазочный слой и может возникнуть воспламенение вследствие трения и нагрева.

Количественная связь между неисправностями синхронных машин и температурой, зафиксированная в настоящем исследовании, легла в основу расчета интегрального показателя технического состояния и интегрального критерия пожарной опасности. Параметры, входящие в формулы 4 и 5, позволяют учитывать как электрические, так и

механические факторы. Такое объединение создает предпосылки для комплексной оценки уровня пожарной опасности.

Уровень пожарной опасности – это количественно выраженная степень вероятности возникновения и развития пожара в пределах рассматриваемого объекта (в данном случае – синхронной электрической машины), с учетом текущего технического состояния, условий эксплуатации и потенциальных последствий для персонала, оборудования и окружающей среды. Критерии пожарной опасности приведены в ГОСТ 12.1.004-91, СП 2.13130.2020, ГОСТ Р 22.1.12-2005. Количественная связь между техническим состоянием синхронных машин и их уровнем пожарной опасности проявляется через диагностические параметры, отражающие наличие электрических и механических дефектов, изменение температурного режима, состояние изоляции и подшипников.

После установления количественных зависимостей между типовыми неисправностями синхронных электрических машин, температурными характеристиками и параметрами гармонического спектра фазных токов и напряжений, целесообразно построение модели, позволяющей обоснованно связать техническое состояние агрегата с его уровнем пожарной опасности. Сложность таких взаимосвязей обусловлена нелинейным характером взаимодействия электрических, тепловых и механических процессов, а также влиянием внешних факторов. В этих условиях традиционные алгоритмы диагностики становятся малоэффективными, что обосновывает применение методов машинного обучения, в частности – искусственных нейронных сетей (ИНС), способных выявлять скрытые зависимости в многомерных данных.

В качестве базовой модели использовалась сверточно-рекуррентная нейросетевая архитектура с элементами многослойного перцептрона, адаптированная для задач регрессии и классификации. Такая гибридная структура позволяет учитывать как текущие значения параметров, так и их временные изменения. Для вычисления интегрального показателя пожарной опасности на вход нейросети подаются следующие параметры:

– интегральный показатель технического состояния машины;

– температура обмоток и подшипников;

– сопротивление изоляции;

– колебания параметров системы возбуждения (включая флуктуации тока возбуждения и напряжения на обмотке возбуждения, отражающие неустойчивость магнитного потока и возможные переходные процессы, приводящие к нагреву и перегрузке);

– коэффициент значимости пожарной опасности синхронной машины (учет потенциальных последствий отказа).

Применение оптимизированных архитектур с автонастройкой гиперпараметров позволяет отказаться от фиксированного количества скрытых слоев и вручную заданных функций активации. В ходе обучения используется адаптивный градиентный оптимизатор (*Adam*), потери минимизировались по функции *MSE* с регуляризацией, выборки формировались как на основе экспериментальных данных, так и методом синтетического моделирования дефектов. Такой подход позволяет достичь высокой точности классификации и стабильной обобщающей способности модели на тестовых данных.

Важно отметить, что в современных реализациях ИНС архитектура сети может адаптироваться автоматически в зависимости от объема и структуры входных данных, цели, задачи и ограничений по вычислительным ресурсам. Это особенно актуально при интеграции модели в автоматизированные системы диагностического мониторинга, где возможно онлайн обучение на поступающих данных с учетом текущего состояния оборудования.

Таким образом, предложенный подход не только обеспечивает количественную оценку уровня пожарной опасности, но и создает основу для построения интеллектуальной системы прогнозирования аварийных режимов и раннего предупреждения на базе спектральных и температурных признаков.

Классификация уровней пожарной опасности (табл. 5) позволяет реализовать эксплуатацию синхронных электродвигателей с учетом динамики изменения уровней пожарной опасности и не допустить аварийного отказа.

Таблица 5 – Классификация уровней пожарной опасности синхронной электрической машины СД-13-34-8

Уровень опасности	Диапазон интегрального критерия	Характеристика технического состояния	Действия персонала
Нормальный	$D_{\Sigma} \leq 0{,}25$	Все параметры в пределах нормы	Плановая эксплуатация
Переходный	$0{,}26 \leq D_{\Sigma} \leq 0{,}5$	Повышение отдельных гармонических составляющих фазных токов и напряжений, слабый рост температуры и/или вибрации	Углубленная диагностика, наблюдение
Опасный	$0{,}51 \leq D_{\Sigma} \leq 0{,}75$	Появление пиковых гармонических составляющих фазных токов и напряжений, устойчивый рост температур, устойчивый рост уровня вибрации	Подготовка к выводу агрегата в ремонт или ограничение нагрузки
Критический	$D_{\Sigma} \geq 0{,}75$	Резкие искажения гармонического спектра фазных токов и напряжений, перегрев, искрение	Немедленная остановка

**составлено авторами*

С учетом изложенного можно утверждать, что использование комплексного подхода – спектрального анализа, интегрального критерия и нейросетевого моделирования – позволяет создать эффективную систему предиктивной диагностики и управления пожарной безопасностью синхронных электрических машин. В дальнейших исследованиях целесообразно сосредоточиться на адаптации предложенной модели для других моделей синхронных электрических машин, уточнении весовых коэффициентов на основе статистических данных и внедрении в существующие системы управления безопасностью на объектах энергетики и нефтехимии.

Вывод. В рамках проведенного исследования было установлено, что метод определения уровня пожарной опасности по параметрам гармонических составляющих фазных токов и напряжений синхронных машин представляет собой актуальное и перспективное направление в области обеспечения пожарной безопасности.

Разработанный подход позволяет осуществлять оперативный мониторинг уровня пожарной опасности синхронных машин, что способствует своевременному выявлению и устранению потенциальных источников возгорания. Метод может быть использован как элемент системы управления пожарной безопасностью промышленных установок. Применение интегрального критерия позволит снизить риск возникновения пожаров.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть сосредоточены на расширении области применения метода, его адаптации к различным типам синхронных машин и условиям эксплуатации. Кроме того, перспективным направлением является разработка рекомендаций по оптимизации системы пожарной безопасности на основе полученных результатов, что может включать в себя разработку алгоритмов управления и контроля, а также совершенствование существующих норм и стандартов в области пожарной безопасности электрооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору «Статистическая информация» [Электронный ресурс] URL: https://gosnadzor.ru/stats/.

2. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий «Итоги деятельности» [Электронный ресурс] URL: https://mchs.gov.ru/deyatelnost.

3. Федеральный закон от 22.07.2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/.

4. Приказ Минэнерго РФ от 08.07.2002 №204 «Об утверждении глав Правил устройства электроустановок»» [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91542/.

5. Правила противопожарного режима в российской федерации. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 16.09.2020 г. № 1479. [Электронный ресурс] URL: https://base.garant.ru/74680206/.

6. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность: утвержден Постановлением Госстандарта СССР от 14 июня 1991 г. № 875: дата введения 1992-07-01. – Москва: Стандартинформ, 1992.

7. ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2012 г. № 1028-ст: дата введения 2014-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2016.

8. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: дата введения 2014-07-01. - Москва: Стандартинформ, 2014.

9. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Методы измерений показателей качества электрической энергии: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 418-ст: дата введения 2014-01-01. - Москва: Стандартинформ, 2014.

10. Баширов М.Г., Дюльдин Н.Д., Васильев И.С., Сидоров Д.А. Электромагнитный спектральный метод диагностики электрических генераторов // Science and business: development ways. – 2022. – №4 – С. 133.

11. İmran Y. Bayramov, Aygun A. Safarova, and Cavida R. Damirova Estimating the state of electrical equipment using fuzzy logic // Third International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science. – 2024. – № 3 – CID 13217-27.

12. Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г. Электромагнитный спектральный метод диагностики турбогенераторов тепловых электростанций // Промышленная энергетика. – 2021. – № 1 – С. 20-26.

13. Hu Chen Assessment of fire risk and fire protection system performance in petrochemical enterprises // Petroleum Refinery Engineering. – 2024. – Vol. 54. – P. 1034-1036.

14. B Omidvar, B Mohamadzadeh Fire event in oil, gas, and petrochemical industries // Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries. – 2023. – P. 155-174. – DOI: 10.1016/B978-0-323-95154-8.00015-3.

15. Congming Ma, Mingjv Jing, Shuya Hou, Juncheng Jiang, Bin Zhang Current status of safety engineering education in // Process Safety Progress. – 2022. – Vol. 41, No. 2. – P. 218-225. – DOI: 10.1002/prs.12306.

16. Roguski JA., Szułczyńska D. Selected formal and legal aspects to emergency plans for high-risk establishments and the state fire service // Safety & fire technology. – 2024. – Vol. 1. – P. 110-113.

17. Nikolai Makhutov, Vladimir Nadein, Mikhail Gadenin, Dmitry Reznikov Risk and industrial safety // RT&A, Special house. – 2022. – Vol. 17, No. 3. – P. 138-142.

18. Bogdan Kołcz Selected formal and legal aspects to emergency plans for high-risk establishments and the state fire service // Safety & fire technology. – 2024. – Vol. 1. – P. 113-117.

19. Diaz V.H., Romero-Troncoso R.J., Osornio-Rios R.A., Garcia-Perez A. Hybrid deep learning framework for fault diagnosis in induction motors via vibration and current signals // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 8. – Art. 2553. – DOI: 10.3390/s24082553.

20. ГОСТ 31819.21-2012. Аппаратура для измерения статические. Счетчики активной энергии классов точности 1 и 2: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2012 г. № 1037-ст: дата введения 2014-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2014.

21. ГОСТ Р 8.655-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 августа 2009 г. № 307-ст: дата введения 2010-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2010.

22. М.Г. Баширов, И.С. Миронова. Разработка интегральных критериев для оценки технического состоя-ния и ресурса машинных агрегатов нефтегазового

производства // SOCAR Proceedings – 2015. – №1 – С.46-55.

23. Xie X., Hu Y., Zhang Y., Liu Y., Wu Y. Experimental study on the interturn short circuit of PMMS stator winding // Transactions of China Electrotechnical Society. – 2022. – Vol. 37 – P. 1967-1975.

24. Ferradj M., Kheloui A., Touhami B., Rebbah F. Bearing faults diagnostic in permanent magnet synchronous motor based on 2D-DWT ant artificial neural network// Engineering reports. – 2024. – Vol. 1. – P.e 12717. – DOI: 10.1002/eng2.12717.

25. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: Учебное пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2004.

26. Verucchi C.J., Bossio G.R., Garcia G.O. Mechanical faults diagnosis in inverter-fed induction motors using MCSA and vibration analysis // IEEE Latin America Transactions. – 2020. – Vol. 18, No. 1. – P. 124-132.

27. Бирюков Е.Ю., Прахов И.В., Удочкина А.С., Хисматуллин А.С. оценка работоспособности электрической машины по амплитудному спектру потребляемых токов // Science and business: development ways. – 2021. – №4 – С. 115-117.

Статья поступила в редакцию 06.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 622.7
EDN: BMIUTM

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТОГО ПОЛУПРОДУКТА ИЗ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАМОВ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2015-0650
AuthorID:493399
ORCID: 0000-0003-0856-4612
ScopusID: 57194587669

СОМОВА Юлия Васильевна, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности»
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, проспект Ленина, 38, e-mail: y.somova@magtu.ru)

SPIN: 8043-9890
AuthorID: 552493
ORCID: 0000-0003-4949-5369
ScopusID: 57191252910

СВИРИДОВА Татьяна Валерьевна, кандидат технических наук,
доцент, кафедры «Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности»
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, проспект Ленина, 38, e-mail: ntv_3110@mail.ru)

SPIN: 6788-7420
AuthorID: 718621
ORCID: 0009-0006-1448-3594

ИГНАТЬЕВА Елена Александровна, старший преподаватель кафедры «Физики»
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, проспект Ленина, 38, e-mail: ignatyeva_elena@list.ru)

Аннотация. В настоящее время комплексное использование техногенных отходов металлургических комплексов приобретает особое значение в связи с ростом экологических проблем и снижением уровня содержания целевых компонентов в исходном сырье. Важным резервом улучшения использования минеральных ресурсов является вовлечение в производство отходов горно-металлургических предприятий. Проблема извлечения железоуглеродистого полупродукта из шлама прокатного и горно-обогатительного производств является актуальной, так как ежегодно в металлургическом переделе образуется большое количество отходов. Объектом исследования были выбраны замасленные железосодержащие шламы донных отложений гидроотвала металлургического предприятия, шламы рудо-обогатительной фабрики. Целью исследования является изучение составов и способов переработки замасленных железосодержащих шламов прокатного производства и шламов горно-обогатительной фабрики. В работе рассмотрены источники образования замасленного шлама прокатного производства, места его накопления. Исследован состав шламов горно-обогатительного производства. Проведен рентгеноспектральный микроанализ, выполнено исследование химического состава гравиметрическим методом, исследован гранулометрический состав проб шламов. Изучены методы и способы переработки замасленного шлама и шлама горно-обогатительного производства. Проведенные исследования позволят подобрать способы переработки техногенных отходов применительно к исследуемому сырью.

Ключевые слова: техногенные отходы, металлургическое производство, замасленные шламы, шлам горно-обогатительного производства, переработка, плавка шламов.

THE USE OF IRON-CARBON INTERMEDIATES FROM METALLURGICAL SLUDGE IN THE FOUNDRY IN ORDER TO REDUCE THE BURDEN ON THE ENVIRONMENT

© The Author(s) 2025

SOMOVA Yulia Vasilyevna, candidate of technical sciences,
head of the department « Industrial Ecology and Health and Safety»
Magnitogorsk State Technical University
(455000, Russia, Magnitogorsk, street Lenin 38, e-mail: y.somova@magtu.ru)

SVIRIDOVA Tatiana Valeryevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the department «Industrial Ecology and Health and Safety»
Magnitogorsk State Technical University
(455000, Russia, Magnitogorsk, street Lenin 38, e-mail: ntv_3110@mail.ru)

IGNATIEVA Elena Alexandrovna, senior lecturer of the department «Physics»
Magnitogorsk State Technical University

(455000, Russia, Magnitogorsk, street Lenin 38, e-mail: ignatyeva_elena@list.ru)

Abstract. Currently, the integrated use of man-made waste from metallurgical complexes is of particular importance due to the growing environmental problems and decreasing content of target components in the feedstock. An important reserve for improving the use of mineral resources is the involvement of mining and metallurgical waste in production. The problem of extracting iron-carbon semi-finished products from rolling and ore-dressing sludge is relevant, since a large amount of waste is generated annually in the metallurgical process. The object of the study was oily iron-containing sludge from bottom sediments of the hydraulic dump of a metallurgical enterprise, sludge from an ore-dressing plant. The purpose of the study is to study the compositions and methods of processing oily iron-containing sludge from rolling production and sludge from a ore-dressing plant. The work considers the sources of formation of oily sludge from rolling production, places of its accumulation. The composition of sludge from mining and processing production was studied. X-ray spectral microanalysis was conducted, the chemical composition was studied using the gravimetric method, and the granulometric composition of sludge samples was studied. Methods and techniques for processing oily sludge and sludge from mining and processing production were studied. The studies will allow selecting methods for processing technogenic waste in relation to the raw materials under study.

Keywords: technogenic waste, metallurgical production, oily sludge, mining and processing sludge, processing, sludge smelting.

Для цитирования: *Сомова Ю.В. Использование в литейном производстве железоуглеродистого полупродукта из металлургических шламов с целью снижения нагрузки на окружающую среду / Ю.В. Сомова, Т.В. Свиридова, Е.А. Игнатьева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 246-257. – EDN: BMIUTM.*

Введение. Ежегодно под полигоны для хранения отходов изымается 10 тысяч гектаров сельскохозяйственных угодий. Более 500 тысяч гектаров земли в России занято отвалами горнодобывающей промышленности, при этом вредное воздействие этих отходов распространяется на территорию, в 10-15 раз превышающую площадь самих отвалов. При этом отнимаются большие площади земельных и сельскохозяйственных территорий и увеличивается экологическая нагрузка на почву. Во многих регионах проблема утилизации промышленных отходов носит острый характер, поскольку свалки и отвалы переполнены, выделение новых территорий под полигоны либо ограничено, либо связано с колоссальными материальными затратами. В тоже время утилизация промышленных отходов требует применения современных технологий и значительных капитальных вложений, где выход на рентабельность возможен только при наличии больших производственных мощностей.

В процессе плавки на каждую тонну стали приходится примерно 12-24 кг шлама. Особо важно учитывать при оценке воздействия шламохранилища на окружающую среду обустройство территории, где накапливаются отходы. Хранение шламов происходит открытым способом, в связи с этим развивается процесс эмиссии загрязняющих веществ в почву, в водные объекты, в атмосферу и в последующем оказывает влияние на здоровье населения и фауну, на флору [1]. Утилизация отходов путем их сброса в отвалы и шламохранилища – экономически неэффективный метод, приводящий к истощению природных ресурсов и загрязнению окружающей среды. В связи с этим все большую актуальность приобретают технологии, позволяющие перерабатывать и использовать техногенные отходы производства, такие как металлургические шламы.

Прокатная окалина – это чешуйчатые частицы различной толщины, образовавшиеся на поверхности горячекатаной стали и состоящие из окислов железа. По химическому составу окалина близка к магнетиту. Основная часть замасленной окалины образуется в прокатных и трубопрокатных производствах, когда нагретая до 1000°С заготовка идет по прокатному стану, контактируя с атмосферным воздухом и кислородом воды охлаждающей жидкости. Каждый проход заготовки по валкам сопровождается отшелушиванием слоя окалины и формированием нового слоя. Окалина сбрасывается в поток смазочно-охлаждающей жидкости. В результате из окалины, смазочных материалов и воды генерируется гетерогенный металлургический отход с размером частиц от 1 мм до 1 см – прокатный шлам. Содержание железа в промасленной окалине достигает 70-80%, в прокатном шламе – 30%, а шлам, осаждающийся в отстойнике для сточных вод прокатных станов, при влажности около 20-30% и содержание смазок 2-3% имеет содержание железа 60-70%. Это делает оба отхода ценным вторичным ресурсом.

Шламы рудо-обогатительного производства образуются в ходе обогатительных операций с железной рудой. Они накапливаются и хранятся на специальном шламохранилище, где складируется пустая порода, которая остается после извлечения железа из руды. Шлам рудо-обогатительного производства складируется до момента наполнения шламохранилища согласно нормам проекта.

В результате естественного обогащения, как показали обследования, выполненные экспертами, тяжелые частицы скопились в верхней части шламохранилища. Сотрудниками Центральной лаборатории комбината и рудоиспытательной станции

были проведены исследования, которые доказали, что в этом техногенном месторождении имеется компонент в виде железного концентрата. Средний показатель концентрации железа в рассмотренных образцах шламов составляет примерно 28,8%.

В связи с вышесказанным, авторы определили следующие задачи:

– провести анализ вещественного состава, а также физических и физико-химических характеристик замасленных шламов, хранящихся в картах складирования;

– определить мощность техногенного образования;

– исследовать вещественный состав, физические и физико-химические свойства шламов, образующихся в процессе деятельности горно-обогатительной фабрики;

– провести пробную плавку на основе шламов горно-обогатительной фабрики;

– изучить химический состав материала, полученного в результате плавки шламов горно-обогатительного производства;

– подобрать способы переработки техногенных отходов применительно к исследуемому сырью.

Методология. Рентгеноспектральный микроанализ проводился с использованием сканирующей (растровой) электронной микроскопии. Рентгеноспектральный микроанализ РСМА – это методика, позволяющая с помощью электронного микроскопа и/или специального электронно-зондового микроанализатора (микрозонда) получить информацию о химическом составе образца в произвольно выбранном участке микроскопических размеров. Суть методики заключается в том, что исследуемый образец помещается в вакуумную камеру растрового или просвечивающего электронного микроскопа и облучается сфокусированным направленным пучком электронов высокой энергии.

Исследование структуры отмытого и высушенного шлама проводилось при увеличениях более 100 крат с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM 6490 LV во вторичных электронах. Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) проводился с использованием специальной приставки к сканирующему микроскопу – системы *INCA Energy.* Качественный и количественный анализ исследуемого шлама проводился в локальной области – в точке и по площади, а также строилась карта распределения химических элементов по исследуемой поверхности.

Для выполнения измерений содержания элементов использовался рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Это один из современных спектроскопических методов исследования вещества с целью получения его элементного состава, т.е. его элементного анализа. Этот метод основан на сборе и последующем анализе характеристического спектра рентгеновского излучения, который испущен анализируемым образцом при облучении исследуемого материала рентгеновским излучением. С его помощью могут быть найдены различные элементы от бериллия (*Be*) до урана (*U*).

Для осуществления элементного анализа методом РФА исходную аналитическую пробу измельчали в два этапа до размера частиц в пробе 63 мкм. В первом этапе использовалась мельница-ступка *PULVERISETTE* 2. Размер частиц на данном этапе составил 100 мкм. Второй этап заключался в домалывании на вибромельнице ММ400, в результате размер частиц составил 63 мкм.

Заключительным этапом в подготовке пробы являлся процесс прессования образца на подложке из борной кислоты на гидравлическом прессе *VANEOX* 40t. Для этого необходимо насыпать мерной ложкой около 7 г борной кислоты в пресс форму и вручную подпрессовывать подложку. С помощью шпателя сверху насыпать равномерно исследуемый материал, слой которого 1,0-1,5мм. Затем образец выдерживался под давлением по 15 сек в три этапа.

Исследование элементного состава проводилось с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра *ARL QUANT'X* (Швейцария). Этот спектрометр предназначен для автоматического проведения экспрессного многокомпонентного анализа различных материалов. Данный прибор оснащен рентгеновской трубкой с родиевым анодом и позволяет анализировать жидкие, твердые, а также сыпучие образцы на наличие в их составе элементов от натрия до урана.

Сущность данного метода состоит в том, что: рентгеновское тормозное излучение, которое возникает в трубке, проходит через соответствующий условию фильтр и попадает на анализируемый образец, вызывая появление вторичного излучения атомов элемента, которые присутствуют в образце. Излучение, которое было описано выше, называется характеристическим. Характеристическое излучение от образца попадает на кремниевый детектор, в котором формируются импульсы токов, пропорциональные энергии фотонов. После чего полученные импульсы обрабатываются, и данные передаются на персональный компьютер.

Программное обеспечение спектрометра – пакет программ *WinTrace* – позволяет проводить качественный, полуколичественный и количественный анализы. Качественный и количественный анализы проводятся с помощью программы *Acquisition Manager.* Результатом качественного анализа является график зависимости интенсивности флуоресцентного излучения от энергии фотонов с поэлементной идентификацией пиков, который выводится на экран монитора компьютера и сохраняется в отдельном файле.

Ситовой анализ проводился механическим способом на ситовом анализаторе (встряхивателе) АС-200у. Перед началом работы был собран комплект, состоящий из поддона и двух сит. На верхнее

крупное сито высыпали навеску высушенной пробы (проба № 1 массой m_1=440,61 г, проба № 2 массой m_2=538,9 г), после чего комплект накрывался крышкой и тарелкой с резиновой прокладкой. Комплект устанавливался на подвижную площадку анализатора, закреплялся откидной скобой и двумя болтами на штоках. На следующем этапе отпускался молоток и анализатор включался в сеть.

Рассев принято считать удовлетворительным, если в течение 1 минуты через отверстия сита будет проходить не больше 1 % оставшегося на сите материала. В данном случае при гранулометрическом анализе шлама продолжительность просеивания составляла 5-10 минут.

В ходе анализа использовали распространенный гравиметрический метод, основанный на осаждении. Навеску исследуемого вещества растворяли в воде, после чего целевой элемент осаждали реагентом в виде труднорастворимого соединения. Полученный осадок отделяли фильтрованием, промывали для удаления примесей, высушивали, прокаливали для приведения к устойчивой форме и взвешивали. Массовую долю определяемого элемента в исходной навеске рассчитывали, исходя из массы прокаленного осадка. Важно отметить, что состав осажденного вещества может отличаться от состава после прокаливания. Поэтому различают осаждаемую и гравиметрическую (весовую) формы. Осаждаемая форма – это соединение, непосредственно выпадающее в осадок из раствора при взаимодействии с реагентом. Гравиметрическая форма, в свою очередь, образуется из осаждаемой формы в результате ее высушивания или прокаливания.

Исследование химического состава проб проводилось на оптическом эмиссионном спектрометре «SpectromaxX» фирмы «Spectro».

Результаты. Пример результатов исследования гранулометрического состава прокатного шлама разных проб представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Гранулометрический состав шламов разных проб

Класс крупности, мкм	$d_{ср}$, мкм	(d_1-d_2), %	Выход	
			г	%
проба № 1				
-100+71	85,5	0,29	95,38	21
-71+45	58	0,36	306,93	69
-45+0	22,5	1	46,95	10,61
проба № 2				
-100+71	85,5	0,29	230,32	42,7
-71+45	58	0,36	269,53	50
-45+0	22,5	1	6,03	1

Результаты исследования выявили преобладание частиц размером 71-45 мкм в пробах №1 и №2. При этом доля частиц менее 45 мкм в обеих пробах минимальна. Следовательно, дисперсный состав шлама в различных пробах схож, что указывает на его однородность и благоприятно скажется на стабильности процессов перера-ботки.

Рисунок 1 иллюстрирует типичную микроструктуру шлама, наблюдаемую методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Пробы с одинаковым номером, но обозначенные и не обозначенные штрихом, были отобраны с разной глубины одной скважины. Полученные изображения подтверждают вывод об однородном гранулометрическом составе различных образцов шлама. При этом в шламе обнаруживаются частицы практически округлой формы и частицы неправильной формы с остроугольными вершинами.

Пример типичного характеристического спектра представлен на рисунке 2. Во всех суммарных рентгеновских спектрах, снятых с площади, по которой распределены частицы шлама в образцах для рентгеноспектрального исследования, присутствуют рентгеновские пики следующих элементов: кальций, углерод, кислород, железо, цинк, магний, алюминий, кремний и сера. При этом интенсивность (высота) пиков различна, что свидетельствует о различиях в содержании этих элементов в различных пробах шламов. Наибольшая высота наблюдается у пиков железа, что говорит о наибольшем содержании этого элемента в шламе. Далее по снижению интенсивности рентгеновских пиков, а, следовательно – и по относительной доле в составе шлама следуют кремний и кальций. Содержание элементов, обнаруженных при наборе суммарных спектров, приведено в таблице 2. Таким образом, лидирующими элементами в шламах являются ценный компонент – железо.

Таблица 2 – Результаты количественного определения элементов (суммарные спектры)

Элемент	Содержание элемента в пробах, вес. %							
	№ 10′	№ 10	№ 3′	№ 3	№ 19′	№ 19	№ 22′	№ 22
C	33.73	42.82	27.27	42.82	33.94	34.72	27.27	35.03
O	39.87	36.36	40.84	36.36	44.25	35.71	40.84	37.60
Mg		1.03		1.03	0.36	0.67		
Al	1.54	1.22	1.45	1.22	0.94	1.70	1.45	2.52
Si	4.16	2.68	4.61	2.68	2.23	3.69	4.61	4.91
S		0.69	1.01	0.69	2.36	0.61	1.01	
Ca	4.35	2.50	4.42	2.50	12.20	3.11	4.42	3.12
Fe	14.96	12.69	18.01	12.69	1.90	18.01	18.01	16.83
Zn	1.40		2.38		1.82	1.39	2.38	

В шламах в отдельных случаях обнаруживались темные частицы, локальный спектральный которых с набором спектра в точке показал присутствие только одного углерода. Это позволяет уверенно идентифицировать такие частицы как графит.

Светлые (белые) частицы, в спектрах которых обнаруживались только цинк и сера являются

сульфидами цинка. Крупные серые частицы, содержащие в своем составе помимо кислорода и углерода кремний и кальций, могут быть идентифицированы, очевидно, как карбонат кальция и оксид кремния.

Результаты определения химического состава замасленного шлама гравиметрическим методом приведены в таблице 3.

Таким образом, анализ полученных результатов элементного рентгеноспектрального микроанализа высушенных шламов прокатного производства позволяет сделать вывод, что в шламе содержатся в основном оксиды и сульфиды указанных элементов в виде частиц разной дисперсности [2].

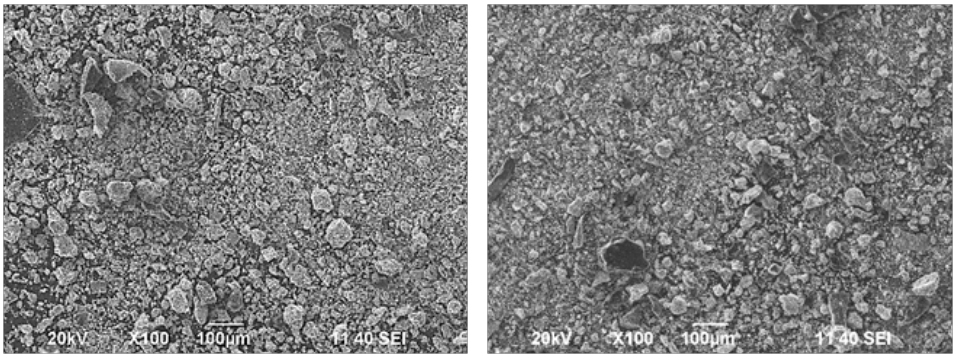


Рисунок 1 – Пример строения шлама различных проб

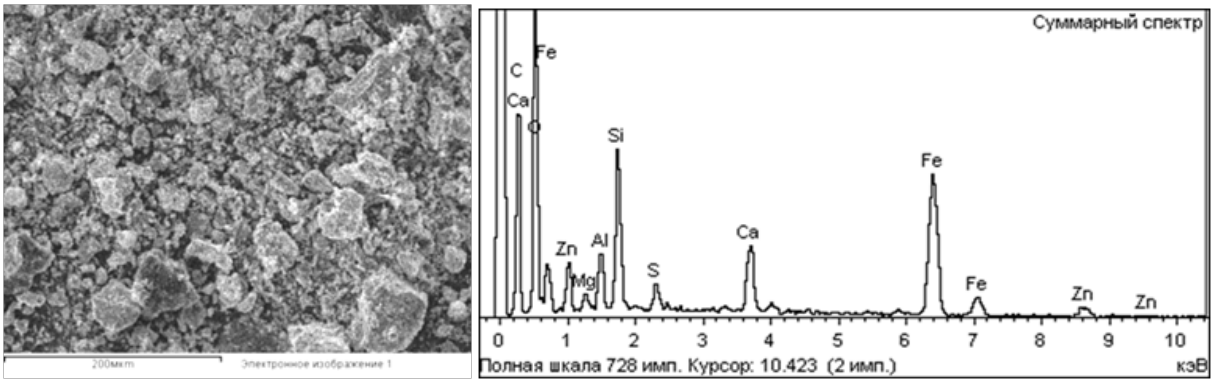


Рисунок 2 – Пример электронного изображения участка и суммарного характеристического спектра

Таблица 3 – Химический состав шлама

Номер пробы	Наименование определяемых характеристик объекта исследований										
	Массовая доля, %										
	Feобщ.	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	ZnO	K_2O	MnO	SO_3	Имп*
1	39,0	11,3	4,80	7,47	0.65	0.40	1.62	0.30	0.42	2.10	14.5
11	36,4	12,4	4,62	7,00	0.62	0.41	2.40	0.33	0.65	2.85	16.0
5	42,2	10,2	4,70	6,58	0.45	0.34	1.53	0.29	0.48	1.88	12.6
51	39,0	10,7	4,67	6,73	0.50	0.32	2.34	0.28	0.37	2.62	14.9
7	36,8	12,5	5,00	6,75	0.45	0.35	2.14	0.29	0.68	2.45	16.0
71	40,4	10,1	4,58	7,50	0.52	0.32	1.74	0.29	0.38	2.08	14.1
31	36,0	11,2	4,40	7,20	0.60	0.42	2.05	0.29	0.50	2.57	18.3
311	43,5	9,0	4,37	6,63	0.55	0.30	1.52	0.28	0.40	2.00	12.5

Имп – потеря массы при прокаливании*

Результаты определения химического состава шлама методом РФА подтвердили, что в пробах шлама преобладают следующие составляющие: железо *Fe*, карбоната кальция ($CaCO_3$) и оксид кремния (SiO_2), а остальные вещества присутствуют в малых количествах. Лидирующими элементами являются ценные компоненты. По результатам исследований было выявлено, что массовая доля содержания *Fe* в пробах колеблется от 36,0 до 43,5%.

Полученные данные позволяют заключить, что шламы прокатного производства являются ценным железосодержащим продуктом для последующей переработки в металлургическом производстве.

Для переработки шламовых продуктов метал-

лургического производства большое значение имеет размер и форма частиц, образующих шлам. Характерный общий вид частиц, образующих шлам, в различных участках проба шлама иллюстрирует рисунок 3.

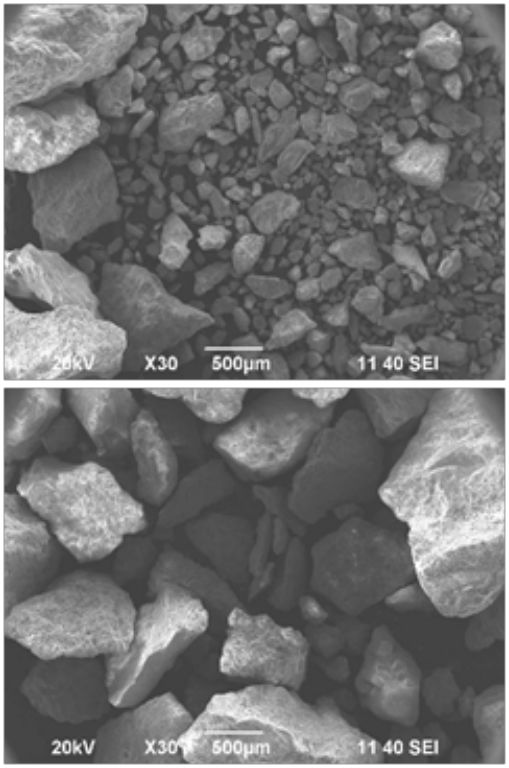


Рисунок 3 – Характерный вид частиц шлама в различных участках пробы

Методом сканирующей электронной микроскопии в сочетании с рентгеновским микроанализом было проанализировано около 200 участков в различных пробах шлама. Размеры части варьировались от 0,2 мкм до 4 мм, что хорошо согласуется с данными гранулометрического исследования.

Анализ результатов исследования свидетельствует, что частицы шламов во всех исследованных пробах крайне разнородны по форме, размерам и объемной доле частиц различных фракций.

Форма частиц была весьма разнообразной: округлой формы, в некоторых случаях близкой к сферической или эллипсоидальной; в виде многогранников неправильной формы; правильной формы, близкой к кубу или параллелепипеду; в виде плоских чешуек и т.д.

Пример результата рентгеноспектрального микроанализа представлен на рисунке 4. При этом спектры снимались чаще всего по выделенной площади в пределах одной частицы, чтобы повысить достоверность результатов. В случае небольших размеров частиц набор спектров проводился по выделенной площади, содержащей несколько частиц.

Наиболее характерные результаты рентгеноспектрального микроанализа демонстрируют рисунок 5. Их анализ показал, что в рентгеновских спектрах всех проанализированных частиц присутствуют пики кислорода и (за исключением двух из них) – пики железа. Также в спектрах практически всех частиц (за исключением двух-трех) обнаруживаются пики кремния, алюминия, кальция и в 90 % случаев – еще и магния. Примерно в половине случаев были выявлены пики натрия и калия, причем их наличие или отсутствие, как правило, фиксировалась в одних и тех же спектрах. И только в двух случаях в спектрах были определены пики фосфора и в трех – пики хлора. Кроме того в некоторых спектрах обнаруживались пики серы и титана.

Во всех пробах шлама визуально наблюдались очень крупные частицы сечением в несколько миллиметров светло-коричневого цвета, в которых при рентгеноспектральном микроанализе обнаруживали сложный элементный состав, как это показано для частицы на рисунке 6 и в таблице 4.

Частицы помимо кислорода и железа содержат в различном количестве натрий магний, алюминий, кремний, калий, кальций, а также титан и фосфор. Это позволяет предположить, что подобные частицы можно идентифицировать как комплексное соединение, в состав которого могут входить оксисульфиды, окислы (шпинели), силикаты, алюмосиликаты.

Во многих случаях такие частицы имеют достаточно правильную форму в виде многогранников.

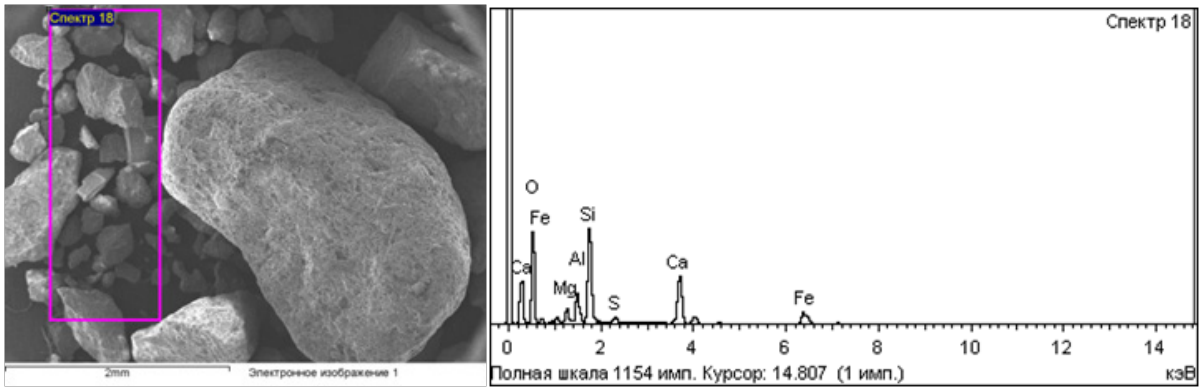


Рисунок 4 – Электронное изображение частиц шлама пробы и характеристические спектры с указанных участков

Таблица 4 – Содержание элементов в частице на рисунке 6

Содержание элементов, вес. %										
O	Na	Mg	Al	P	Si	S	K	Ca	Ti	Fe
53,21	3,14	1,51	6,12	0,77	18,26	0,50	0,96	7,02	0,96	7,55

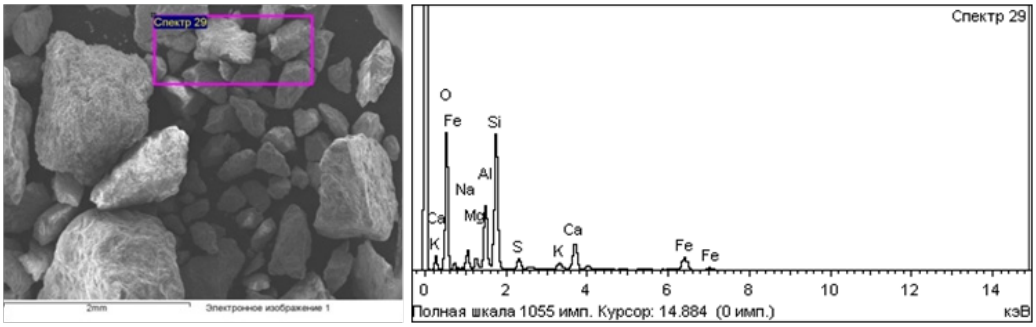
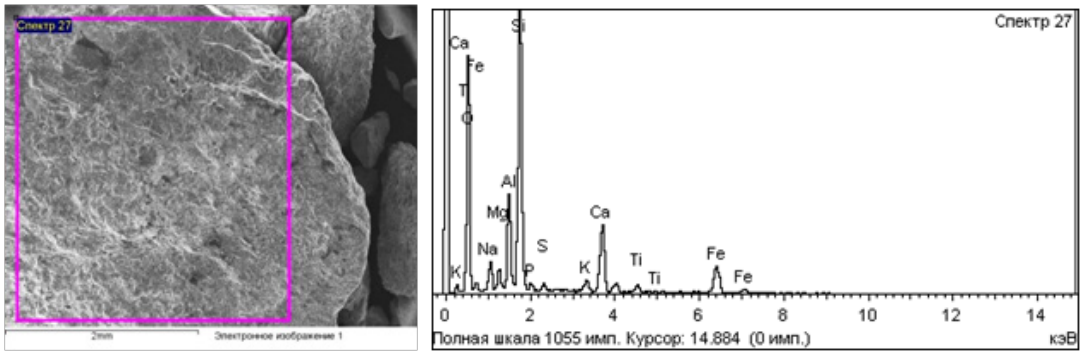


Рисунок 5 – Электронное изображение частиц шлама пробы 3кр и характеристические спектры с указанных участков



а) *б)*

Рисунок 6 – Электронное изображение (а) с частицей сложного состава в шламе пробы 3кр, характеристический спектр (б), набранный по указанной площади в пределах частицы

При рентгеноспектральном микроанализе в образцах наблюдались светлые частицы, в которых, наряду с кислородом и железом, содержались только алюминий, кремний и кальций. Это позволяет отнести такие частицы, возможно, к силикатам типа $2FeO{\cdot}SiO_2$, алюмосиликатам типа $3Al2O_3{\cdot}2SiO_2$, $Al2O_3{\cdot}SiO_2$ или сложным окислам (шпинелям) типа $CaO{\cdot}Al_2O_3$, $FeO{\cdot}Al_2O_3$.

Следует отметить, что элементный состав в частицах разной морфологии мог быть аналогичным по набору элементов и близким по количественным характеристикам. Это свидетельствует об отсутствии связи химического состава с морфологическими особенностями частиц шлама. Так сера могла присутствовать и в мелких, и в крупных частицах одной и той же пробы. Хлор, как уже отмечалось выше, обнаруживается в разных частицах.

Результаты количественного анализа элементного состава шламовых проб представлены, в таблице 5 и графически проиллюстрированы на рисунках 7-10 (на рисунках не приведены результаты определения содержания фосфора и хлора, поскольку они присутствовали только в нескольких спектрах).

Их анализ свидетельствует, что в пределах каждой анализируемой пробы шламов элементный состав и содержание элементов в спектрах, полученных от частиц, варьируется в очень широких пределах. Наиболее сильно различаются минимальное и максимальное содержание каждого элемента в частицах. Это особенно касается наиболее ценного компонента – железа в связи с тем, что в пробах шлама присутствуют отдельные достаточно крупные частицы с очень высоким содержанием железа – до 40%, в то время как в основном содержание железа в частицах шлама чаще всего не превышает 8-18% (табл. 5).

Среднее, минимальное и максимальное содержание элементов в пробах, определенное по всем количественным оценкам приведено на рисунке 11. Эти данные показывают, что больше всего в частицах шламов содержится кислорода (~ до 60%), затем следует кремний и кальций (~ до 28 %), алюминий (~ до 13%) и железо (~ до 20% и 40% в одной из частиц). Содержание магния, калия и натрия элементов в частицах не превышает 3-11% каждого, а фосфор и хлор содержатся в количестве не более 0,5-1,5%.

Содержание элементов, усредненное по всем данным количественного рентгеноспектрального микроанализа, приведено в таблице 6 и показано на рисунке 12. Оно подтверждает сделанные выше заключения по элементному анализу отдельных проб.

Таблица 5 – Среднее, минимальное и максимальное содержание элементов в частицах шламов проанализированных проб

Элемент	Содержание элемента, вес. %											
	проба 1кр			проба 3кр			проба 5кр			проба 7кр		
	сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.
O	55,75	49,76	63,7	53,93	42,55	58,49	53,46	46,58	56	55,05	50,52	57,9
Na	3,20	0,7	5,86	3,32	0,98	4,88	3,21	1,22	6,13	1,97	1,42	2,86
Mg	3,16	0,57	11,3	1,90	0,65	3,4	1,88	0,56	3,68	2,60	1,14	8,95
Al	6,89	2,1	8,95	6,40	0,57	10,7	5,96	3,95	9,67	5,99	1,34	12,62
Si	16,54	0,96	24,81	18,84	10,6	25,36	18,54	13,23	26,54	17,86	15,56	20,28
S	5,17	0,65	17,38	0,72	0,36	1,31	1,04	0,61	2,14	0,835	0,65	1,06
K	1,93	0,54	5,88	1,39	0,84	2,82	2,79	0,89	8,14	1,488	0,64	4,5
Ca	8,28	0,71	28,08	7,34	2,72	21,46	8,03	0,92	16,66	9,225	2,79	12,83
Ti	1	0,63	1,45	0,96	0,96	0,96	0,76	0,76	0,77	0,73	0,73	0,73
Fe	5,22	0,82	7,6	8,48	0,72	39,49	7,99	0,77	18,38	7,37	2,54	16,82
P				0,5	0.5	0,5	1,52	1,52	1,52			
Cl	0,87	0,69	0,97	0,5	0,5	0,5	0,89	0,5	0,97			

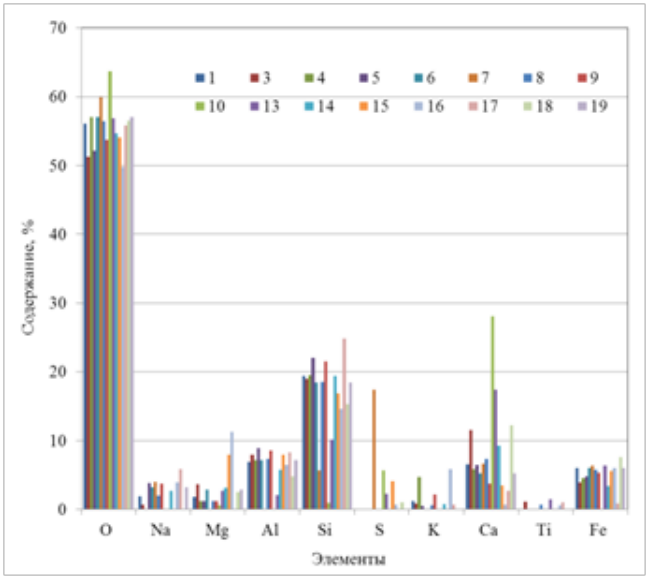


Рисунок 7 – Содержание элементов по спектрам пробы 1кр

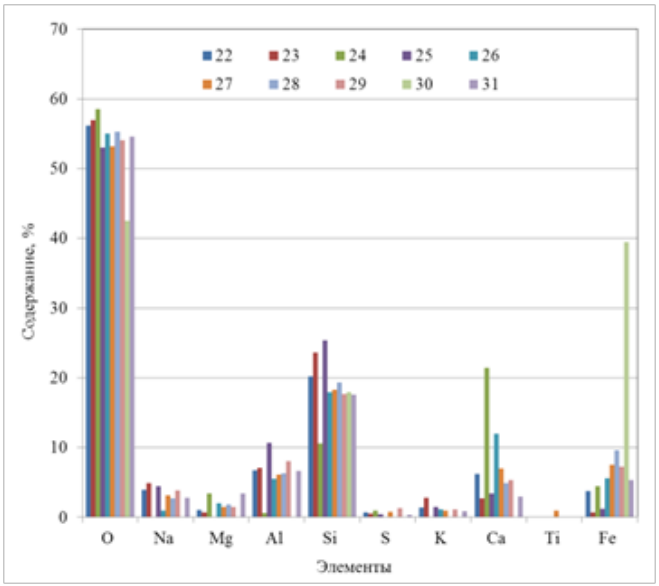


Рисунок 8 – Содержание элементов по спектрам пробы 3кр

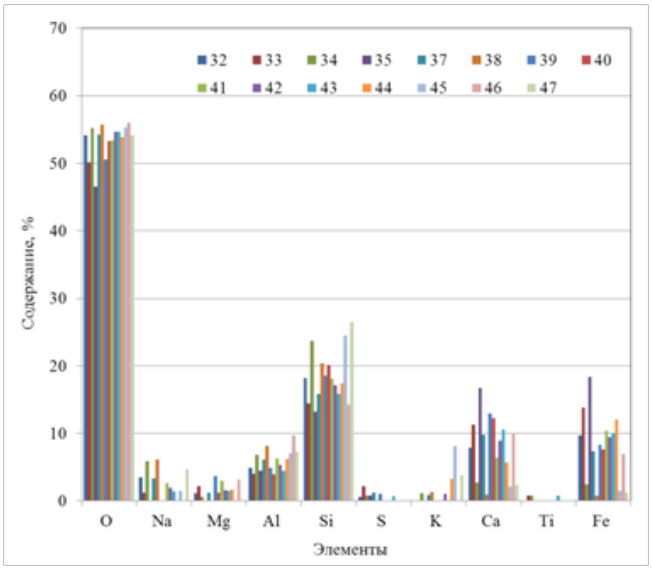


Рисунок 9 – Содержание элементов по спектрам пробы 5кр

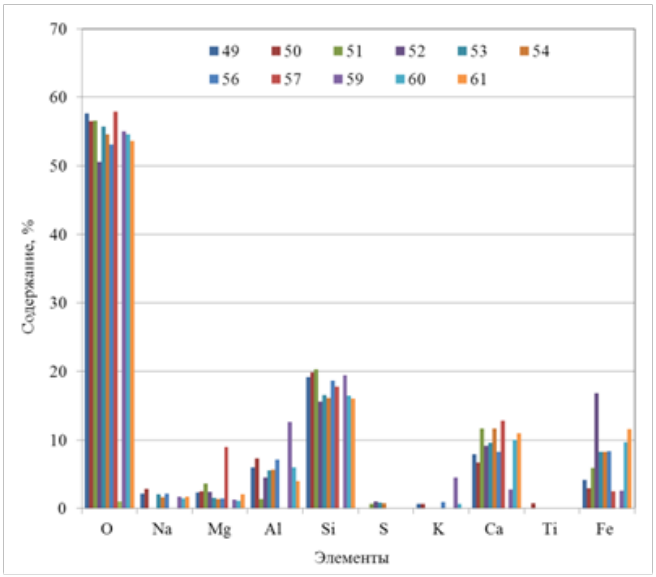


Рисунок 10 – Содержание элементов по спектрам пробы 7кр

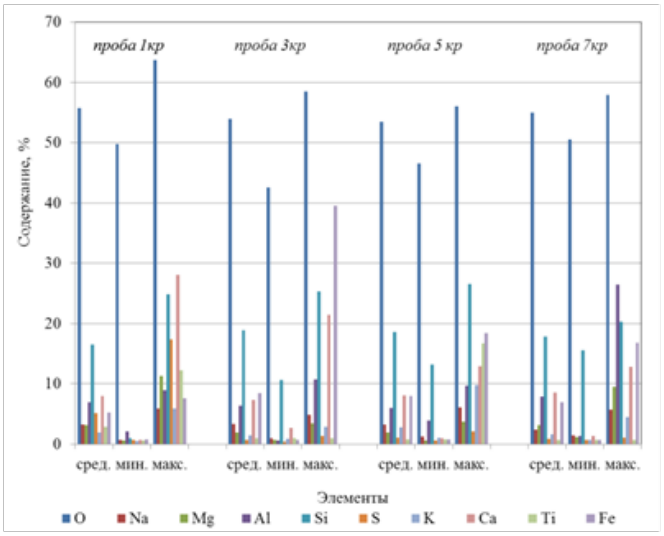


Рисунок 11 – Среднее, минимальное и максимальное содержание элементов в пробах, определенное по всем количественным оценкам

Таблица 6 – Содержание элементов, усредненное по всем данным количественного рентгеноспектрального микроанализа

Элемент	Содержание элемента, вес. %		
	среднее	минимальное	максимальное
O	54,55	47,01	58,35
Na	2,93	1,13	4,80
Mg	2,39	0,75	6,19
Al	6,32	1,97	10,70
Si	17,94	11,39	24,17
S	1,94	0,56	3,77
K	1,90	0,75	5,26
Ca	8,22	1,52	18,57
Ti	0,86	0,79	0,91
Fe	7,27	0,74	22,43
P	1,01	1,01	1,01

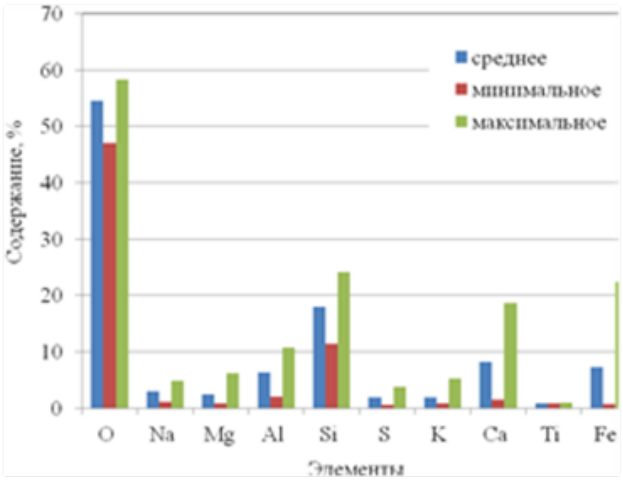


Рисунок 12 – Содержание элементов, усредненное по всем данным количественного рентгеноспектрального микроанализа

Обсуждение. Выбор технологии переработки замасленных шламов определяется требованиями к их конечному использованию. В частности, к шламам, предназначенным для агломерации, предъявляются строгие требования по содержанию масел – оно не должно превышать 0,30%.

По результатам анализа существующих технологий была разработана технология отмывки замасленных шламов и стенд для апробации ее в лабораторных условиях [3-8].

На заявленный способ получен патент РФ RU 2 393 923 C1 [9].

Замасленный шлам пригоден для брикетирования, обезмасленная окалина для использования в порошковой металлургии и агломерационном производстве, а отработанные масла, классифицируемые как отработанные нефтепродукты, могут быть переработаны с целью регенерации смазочных масел.

Отходы, образующиеся в результате деятельности горно-обогатительной фабрики, представляют из себя сыпучий материл. По результатам проведенных исследований, результаты которых приведены выше в разделе 3, было выявлено, что в шламах содержится большое количество оксидов железа Fe_2O_3 и FeO. Для восстановления железа из окислов была проведена восстановительная плавка.

Для проведения пробной плавки на основе шлама он был предварительно подготовлен. В высушенном шламе отмагнитили магнитную часть. После того как извлекли большую часть магнитной фракции, была произведена индукционная плавка в индукционной печи. Тигель, который использовался для плавки, был изготовлен в виде стакана из шамота.

В результате того, что в коксе содержится углерод, произошло восстановление металлической части отходов, содержащих окись железа. В процессе плавки Fe_2O_3 и FeO восстановились до металлического железа. При этом процесс сопровождался науглероживанием, а также шлакообразованием.

При восстановлении в результате реакции углерода с кислородом согласно формулам (1, 2) образуется углекислый газ, который выделялся в атмосферу, проходя через слой шлаков и создавая определенный кип.

$$2FeO + C = 2Fe + CO_2\uparrow \quad (1)$$

$$2Fe2O_3 + 3C = 4Fe + 3CO_2\uparrow \quad (2)$$

По характерному кипа, который наблюдался во время плавки, можно сделать заключение, что процесс восстановления протекал на протяжении всей плавки.

После плавки тигель охладили и провели ряд исследований для изучения химического состава полученного материала.

Результаты исследования химического состава выплавленного материала свидетельствуют о значительном превышении содержании серы и углерода. Повышение содержания серы связано с тем, что при восстановлении железа вносился кокс, содержащий серу. Данную проблему можно решить путем наведения белых шлаков и десульфурации в ковше с использованием натриевой соли.

Выводы. На основании результатов рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофлуоресцентного и гравиметрического анализов установлено, что в пробах шлама прокатного производства преобладают следующие составляющие: окислы железа, карбонат кальция ($CaCO_3$) и оксид кремния (SiO_2), а остальные вещества присутствуют в малых количествах. Выявлено, что массовая доля содержания железа колеблется от 36,0 до 43,5%.

Анализ полученных результатов рентгеноспектрального элементного микроанализа и рентгенофлуоресцентного анализа высушенных шламов горно-обогатительного комплекса позволяет сделать вывод, что в шламе содержатся в основном оксиды и сульфиды кремния, алюминия, кальция и железа в виде частиц разной морфологии. При этом размеры и химический состав частиц шлама варьируется в широком диапазоне. Содержание железа составляет в частицах шлама от 18 до 40 %.

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что замасленный шлам представляет собой ценное техногенное сырье, перспективное для использования в качестве вторичного ресурса.

Показано, что для переработки замасленного шлама целесообразно использовать роторно-импульсный аппарат. Замасленный шлам может быть использован для брикетирования, обезмасленная окалина находит применение в порошковой металлургии и агломерационном производстве, а отработанные масла, относящиеся к отработанным нефтепродуктам, после регенерации могут быть повторно использованы в качестве смазочных масел. Или Замасленный шлам является сырьем для брикетирования, обезмасленная окалина – для порошковой металлургии и агломерационного производства, а отработанные масла могут быть переработаны в смазочные масла, так как являются отработанными нефтепродуктами.

Шламы горно-обогатительного производства являются ценным вторичным сырьем для металлургического производства, в которых путем плавки шламов с коксом в индукционной печи окись железа, содержащаяся в шламах, в большом количестве восстанавливается до железа.

Шламы рудо-обогатительного производства возможно включить в технологический процесс путем переработки методом восстановительной плавки шламов с коксом в индукционной печи, в результате которой окислы железа, содержащиеся в шламах, в большом количестве восстанавливаются до железа.

Использование переработанных шламов прокатного и рудо-обогатительного производств в технологиях черной металлургии снижает экологическую нагрузка на окружающую среду, т. к. уменьшается объем складируемых отходов, а соответственно, и полигонов [10]. При использовании отходов в качестве вторичного сырья предприятие может рассчитывать на следующее экономическое стимулирование согласно ФЗ №89 от 24.06.1998: уменьшается размер платы за негативное воздействие на окружающую срезу при складировании отходов, предоставляются налоговые льготы [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Технологическая оценка минерального сырья Методы исслед., Справочник / [Адамов Э.В. и др.]; Под ред. П.Е. Остапенко. – М.: Недра, 1990. – 263 с.

2. Сомова, Ю.В. Определение вещественного состава замасленных шламов прокатного производства ПАО «ММК» с целью использования их в литейных технологиях / Ю.В. Сомова, М.Г. Потапов, П.А. Алексеева // В книге: Актуальные проблемы современной науки, техники и образования Тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции. – Магнитогорск, Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2024. – С. 298.

3. Сомова Ю.В. Исследование замасленных шламов донных отложений металлургического производства и разработка технологии их переработки / Ю.В. Сомова // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов IV междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 2. – С. 175-182.

4. Валеев В.Х. Исследование процесса механической промывки замасленных шламов донных отложений в условиях гидродинамической кавитации / В.Х. Валеев, Ю.В. Сомова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 3. – С. 55-58.

5. Сомова Ю.В. Переработка замасленных шламов донных отложений металлургического производства / Ю.В. Сомова, В.Х. Валеев, В.Д. Черчинцев // Сталь. – 2009. – № 3. – С. 86-87.

6. Сомова Ю.В. Замасленные шламы донных отложений и технология их переработки / Ю.В. Сомова, И.В. Зюзина // Сб. тез. докл. Междунар. науч. симпозиума «Безопасность биосферы-2009». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 72.

7. Сомова Ю.В. Разработка способа переработки замасленной окалины прокатного производства / Ю.В. Сомова, В.Х. Валеев, М.В. Авдеева // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2007. – Вып.7. – С. 150-153.

8. Somova Yu.V. Analysis of Methods for Processing Oily Mill Scale and Oily Sludge for Iron and Steel Production / Yu.V. Somova, T.V. Sviridova, P.A. Alekseeva, E.A. Nekerov, D. Schwabecher // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. – Krasnoyarsk, 2021. – С. 42046.

9. Пат. 2393923 Россия, МПК С1. Способ переработки замасленной прокатной окалины и замасленных шламов металлургического производства / В.Х. Валеев, В.Ф. Колесников, Ю.В. Сомова и др. – Опубл. 10.07.2010, Бюл. № 19.

10. Сомова Ю.В. Снижение техногенной нагрузки на

окружающую среду / Ю.В. Сомова, П.А. Алексеева, Д. Швабехер, Д.А. Куц // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2022. – № 21. – С. 226-231.

11. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.98 N 89-ФЗ.

12. Барышев В.Г. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии: справочник. В 2-х т. /В.Г. Барышев, А.М. Горелов, Г.И. Папков. – М.: Экономика, 1986. – 344 с.

13. Буланов В.Я. Использование замасленной окалины / В.Я. Буланов, Л.В. Ваулин // Металлург. – 2002. – № 1. – С. 34-36.

14. Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях: справочник / Б.Л. Вахлер. – М.: Металлургия, 1977. – 320 с.

15. Галкин Ю.А. Современные технологии и оборудование для очистки оборотных и сточных вод предприятий черной металлургии /Ю.А. Галкин // Сталь. – 2006. – № 5. – С. 131-133.

16. Гладских В.И., Мониторинг экологической безопасности шламохранилища № 2 горно-обогатительного производства ОАО «ММК» / В.И. Гладских, А.И. Суров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2007. – № 2. – С. 88-90.

17. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2020 году. Челябинск: Министерство экологии Челябинской области. 2021. – 385 с.

18. Доклад об экологической ситуации в Челябинской области в 2018 году. Челябинск: Министерство экологии Челябинской области. 2019. – 184 с.

19. Захарова Ольга Владимировна. Воздействие высокодисперсного металлургического шлама на сельскохозяйственные растения: диссертация ... кандидата биологических наук: 03.02.08 / Захарова Ольга Владимировна; [Место защиты: Российский университет дружбы народов].- Москва, 2016. – 143 с.

20. Кравченко В.М. Использование жезосодержащих шламов в черной металлургии /В.М. Кравченко, В.Я. Лащеев, А.А. Горбунова // Черная металлургия. Бюл. Ин-та «Черметинформация». – 1990. – Вып.2. – С. 1-18.

21. Леонов, С.Б. Исследование полезных ископаемых на обогатимость: учеб. пособие / С.Б. Леонов, О.Н. Белькова. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 631 с.

22. Лисин В.С. Ресурсо-экологические решения по утилизации отходов металлургического производства / В.С. Лисин, В.Н. Скороходов, И.Ф. Корунов и др. // Черная металлургия. Бюл. Ин-та «Черметинформация». – 2003. – № 10. – С. 64-71.

23. Патент на изобретение RU 2824978 C2. Способ переработки железоцинксодержащих отходов металлургического производства. Заявитель: Хуснутдинов И.Ш., Асылгареев Р.Т., Шангараева А.З., Хуснутдинов С.И., Сафиулина А.Г., Гаффаров А.И., Хасанов К.Ф.; опубл. 19.08.2024.

24. Пугин К.Г. Промышленная экология. Утилизация крупнотоннажных отходов производства: учебное пособие / К.Г. Пугин. – Пермь: ПНИПУ, 2016. – 96 с. – ISBN 978-5-398-01559-1.

25. Разделение замасленной окалины на компоненты Хамидуллин Р.Н., Величко М.Ю., Грищенко М.В. Металлург. – 2023. – № 10. – С. 118-121.

26. Сериков Н.Ф. Водное хозяйство заводов черной металлургии / Н.Ф. Сериков, Г.Н. Красавцев. – М.: Металлургия, 1973. – 407 с.

27. Синицин Н.Н. Разработка технологии изготовления брикетов на основе замасленной окалины /Н.Н. Синицин, Г.С. Козлов, В.Ф. Чирихин // Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства: материалы первой Международной науч.-техн. конф. – Череповец: ЧГУ, 1998. – С. 153.

28. Сорокин Ю.В. Переработка и использование техногенных отходов на предприятиях горно-металлургической отрасли / Ю.В. Сорокин, Л.А. Смирнов, Л.А. Шубина // Сталь. – 2005. – № 6. – С. 148-150.

29. Термодинамическое моделирование восстановления цинка из шламов черной металлургии Клеоновский М.В., Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Лозовая Е.Ю. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2022. – Т. 65. – № 3. – С. 170-178.

30. Технологические решения по вовлечению шламов в рециклинг металлов Орехова Н.Н., Горлова О.Е. В сборнике: Современные достижения университетских научных школ. Сборник докладов национальной научной школы-конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». 2022. – С. 172-179.

31. Технологическое моделирование совместного выщелачивания замасленной прокатной окалины и красного шлама Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Чесноков Ю.А., Маршук Л.А. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т. 63. – № 11-12. – С. 891-898.

32. Утилизация железосодержащих металлургических отходов: учебное пособие / В.А. Бигеев, Н.В. Панишев, А.М. Столяров [и др.]; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова". – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорского гос. технического ун-та, 2021. – 113 с.: ил., табл.: 20 см.; ISBN 978-5-9967-2301-0.

33. Шаболин А.Ф. Очистка и использование сточных вод на предприятиях черной металлургии /А.Ф. Шаболин – М.: Металлургия, 1968. – 508 с.

34. Айткенов Н.Б., Смаилов С.А., Жабалова Г.Г., Монголхан О. Металлургия вндірісінің құрамында темір бар қалдықтарынан металданган өнімді алу. Труды университета. – 2022. – № 4 (89). – С. 80-84.

35. Беккалиев Н.М., Утебалиева Н.З.Қабырға керамикасы технологиясында металлургия қалдықтарын қолдану. Батыс Қазақстан инновациялық-технологиялық университетінің хабаршысы. – 2018. – № 2. – С. 33-37.

36. Zhunusov A., Kenzhebekova A., Zhunusova A. Recycling of metallurgical wastes. Science and Technology of Kazakhstan. – 2021. – № 4. – С. 59-66.

37. Темірбаева Г.Р., Үкібаева Г.Қ. Металлургия өндірісінде қалдықтарды тиімді пайдалану проблемалары. Новости науки Казахстана. – 2022. – № 3 (154). – С. 46-55.

38. Abdurashidov Ja., Yusupov A., Daminova Sh. Determination of chemical and mineralogical forms of rare metals contained in technological waste of "almalyk mining and metallurgical complex" jsc. Universum: chemistry and biology. – 2023. – № 8-2 (110). – С. 19-23.

Статья поступила в редакцию 04.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 504.3.054; 543.054
EDN: BWKNLV

МЕХАНИЗМ СОРБЦИИ НИКЕЛЯ НА АКТИВИРОВАННОМ УГЛЕ ИЗ ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПИРОЛИЗА ИЗНОШЕННЫХ ШИН

© Автор(ы) 2025
SPIN-код 6169-8590
РИНЦ Author ID 448228
ORCID: 0000-0002-1313-6826
Scopus ID: 55895350100
Researcher ID: P-7345-2015

ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна, доктор технических наук,
профессор, заведующая кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)
ХУДОЙБЕРДИЕВ Максуджон Саиджон-Угли, ведущий специалист
ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Приволжскому федеральному округу»
(440000, Пенза, ул. Пушкина, 167а, E-mail: khudoyberdiew@gmail.com)

Аннотация. Исследован механизм сорбции ионов никеля (Ni^{2+}) на активированном угле из твердого остатка пиролиза изношенных автомобильных шин. Активированный уголь получен путем последовательной трехступенчатой химической обработки твердого остатка пиролиза шин вначале соляной кислотой, затем азотной кислотой при нагревании и, наконец, гидроксидом натрия с использованием ультразвуковой обработки. Исследование процессов сорбции проводили в модельных растворах с различными концентрациями ионов никеля. Для определения механизма сорбции и выявления лимитирующих стадий процесса использовали модели диффузионной и химической кинетики. Оценку вклада внешней и внутренней диффузии на скорость процесса сорбции проводили с помощью моделей Бойда, Бойда-Адамса-Майерса и Вебера-Морриса. Выявлено, что сорбция ионов Ni^{2+} протекает по смешанно-диффузионному механизму. Для анализа кинетических кривых сорбции никеля использовали модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка. Кроме того, для оценки вклада десорбции в кинетику извлечения никеля, увеличивающегося при приближении к равновесному состоянию, использовали модель Еловича, позволяющую учитывать изменение количества сорбированного вещества на поверхности с течением времени. Установлено, что модель псевдо-первого порядка удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные при низких концентрациях никеля, а модель псевдо-второго порядка, удовлетворительно описывает кинетические кривые сорбции при средних и высоких концентрациях ионов никеля. В целом можно сделать вывод, что на поверхности угля из твердого остатка пиролизованных шин, активированному предложенным способом, сорбция протекает по хемосорбционному механизму. На это указывают высокие значения коэффициента корреляции моделям псевдо-первого и псевдо-второго порядка и рассчитанная по уравнению Дубинина – Радушкевича энергия активации. Для увеличения скорости и эффективности сорбции ионов никеля на предложенном сорбенте предложено ввести на его поверхность дополнительные функциональные группы, что позволит задействовать больше активных центров для реакции, а также оптимизировать такие параметры как pH и температура.

Ключевые слова. безопасность, тяжелые металлы, ионы никеля, активированный уголь, твердый остаток пиролиза шин, механизм, кинетика, изотермы сорбции.

MECHANISM OF NICKEL SORPTION ON ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM SOLID PYROLYSIS RESIDUE OF WORN TIRES

© The Author(s) 2025
TARANTSEVA Klara Rustemovna, doctor of technical sciences,
professor, head of the Department of Biotechnology and Technosphere Safety
Penza State Technological University
(440039, Penza, Baidukova proezd/Gagarina st., 1a/11, E-mail: krtar2018@bk.ru)
KHUDOYBERDIEV Maksudzhon Saidzhon-Ugli, leading specialist
Center for laboratory analysis and technical measurements in the Volga Federal District
(440000, Penza, Penza, Pushkin st., 167a, E-mail: khudoyberdiew@gmail.com

Abstract. The mechanism of nickel ion (Ni^{2+}) sorption on activated carbon from the solid residue of worn-out tire pyrolysis was studied. Activated carbon was obtained by successive three-stage chemical treatment of the solid residue of tire pyrolysis: first with hydrochloric acid, then with nitric acid upon heating, and finally with sodium hydroxide using ultrasonic treatment. The sorption processes were studied in model solutions with different concentrations of nickel ions. Diffusion and chemical kinetics models were used to determine the sorption mechanism and identify the rate-limiting stages of the process. The contribution of external and internal diffusion to the sorption process rate was estimated using the Boyd, Boyd-Adams-Myers, and Weber-Morris models. It was found that the sorption of Ni^{2+} ions occurs

via a mixed-diffusion mechanism. At low concentrations of nickel ions in the solution, the experimental data are well described by the Boyd external diffusion model. With a further increase in the Ni^{2+} concentration, the sorbent surface is rapidly saturated, after which internal diffusion begins to play a more significant role. To analyze the kinetic curves of nickel sorption, pseudo-first and pseudo-second order models were used. In addition, to assess the contribution of desorption to the kinetics of nickel extraction, which increases as the equilibrium state is approached, the Elovich model was used, which allows one to take into account the change in the amount of the sorbed substance on the surface over time. It was found that the pseudo-first order model satisfactorily describes the obtained experimental data at low nickel concentrations, and the pseudo-second order model satisfactorily describes the kinetic curves of sorption at medium and high concentrations of nickel ions. In general, it can be concluded that on the surface of coal from the solid residue of pyrolyzed tires, activated by the proposed method, sorption occurs by the chemisorption mechanism. This is indicated by the high values of the correlation coefficient for the pseudo-first and pseudo-second order models and the activation energy calculated using the Dubinin-Radushkevich equation. To increase the rate and efficiency of sorption of nickel ions on the proposed sorbent, it is proposed to introduce additional functional groups onto its surface, which will allow more active centers to be used for the reaction, as well as to optimize such parameters as pH and temperature.

Keywords: safety, heavy metals, nickel ions, activated carbon, solid residue of tire pyrolysis, mechanism, kinetics, sorption isotherms.

Для цитирования: *Таранцева К.Р. Механизм сорбции никеля на активированном угле из твердого остатка пиролиза изношенных шин / К.Р. Таранцева, М.С.У. Худойбердиев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 258-266. – EDN: BWKNLV.*

Введение. Для формирования безопасной среды обитания для человека необходимо стремиться к снижению негативных факторов производственно-хозяйственной деятельности и их влияния на уровень экологической безопасности. С этой целью необходима разработка научных и инженерных решений, направленных на повышение экологической безопасности опасных объектов и технологий.

Ионы никеля попадают в сточные воды в результате применяемых в настоящее время различных технологий никелирования деталей на предприятиях различного профиля [1]. Накопление этих ионов в организме человека приводит к болезням сердца, почек и др. [1, 2]. Несмотря на существующие методы очистки сточных вод от ионов никеля, полное извлечение его из стоков остается актуальной проблемой. Из существующих методов очистки сточных вод от ионов никеля, адсорбция является наиболее экономичной [3-5] исходя из эффективности, стоимости и срока службы очистных установок.

Активированный уголь широко применяется в сорбционной очистке сточных вод от ионов тяжелых металлов вследствие его высокой эффективности и низкой стоимости [3]. Его получают из каменноугольного, растительного и нефтяного сырья. Однако, в связи с сокращением и дороговизной ископаемого и растительного сырья, актуален поиск новых, более дешевых и доступных материалов для производства активированных углей [6].

Перспективным материалом для производства активированных углей является твердый остаток, образующийся в результате сухого пиролиза отработанных автомобильных шин. Он состоит из смеси углерода (более 83%), кислорода (более 8%) и других элементов (*S, Si, Zn, Al, Ca, Mo* и др., около 9%) и имеет пористую структуру [7]. В исходном виде, т.е. после пиролиза, поры данного материала загрязнены циклическими соединениями с размерами молекул до 0,6 нм [8], а также цинком (*Zn*, 267096,80 мг/кг), кремнием (*Si*, 201659,00 мг/кг), щелочными (*K*, 5903,23 мг/кг; *Na*, 6802,76 мг/кг), щелочноземельными (*Ca*, 12184,33 мг/кг; *Mg*, 10119,82 мг/кг) и переходными (*Cu*, 2985,25 мг/кг; *Fe*, 4642,40 мг/кг) металлами [9]. Кроме того, поверхность твердого остатка пиролиза шин является гидрофобной [10], что препятствует его использованию в качестве сорбента. Поэтому, для успешного применения твердого остатка пиролиза шин в качестве сорбента для очистки сточных вод необходима химическая очистка и активация его поверхности.

Известно много способов очистки и переработки твердого остатка пиролиза шин. Минхайдаровой Г.В. [11] предложено удалять газообразные примеси дополнительным нагревом при 500°С в течение 20-30 минут и проводить радиационно-химическую модификацию. Обработанный таким образом активированный уголь по свойствам был близок к БАУ-А и пригоден для очистки сточных вод и сорбции нефти. В работе [12] проводилась предварительная газификация при 980°С и последующий пиролиз шин при 600°С, что позволило получить сорбент с высокой удельной поверхностью.

Авторы [6, 15] активировали уголь перегретым водяным паром, и получили уголь по свойствам, сопоставимый с углями БАУ и ДАУ. Активация бутадиенстирольной крошки водяным паром [15] позволила получить угли по зольности и адсорбционным свойствам соответствующие древесным углям ОУ-В, ОУ-Г и УАФ.

Макаревич Е.А. [13] использовал метод тяжелосредного обогащения твердого остатка пиролиза шин и последующее прокаливание при 800-850°С, тем самым уменьшив его зольность и устранив запах.

В работе [14] получали сорбенты из отработанных шин БелАЗ/КамАЗ путем обработки их

гидроксидом натрия с УЗ-воздействием, снижающем зольность.

Авторы [13] предложили магнитную и химическую обработку для деминерализации пиролизного остатка шин. Магнитная сепарация снизила зольность на 5,8%. Последующая химическая обработка 35%-ном *HCl*, 10%-ном *NaOH* и 40%-ном *HF* при 85°С позволила удалить металлы и достичь зольности менее 1 масс. %.

Выявлено также, что кислотная обработка улучшает характеристики пиролизованной шины [16]. Так, обработка азотной кислотой (HNO_3) увеличила активную поверхность угля и его адсорбционную емкость до 46,51 мг/г. Использование смеси соляной (*HCl*) и азотной кислоты для обработки пиролизного остатка позволило повысить его адсорбционную емкость до 54,8 мг/г [17, 18]. Кислотно-щелочная обработка (HNO_3 + гидроксид натрия (*NaOH*)) увеличила активную поверхность до 74 м^2/г [18, 19].

Таким образом, анализ существующих способов переработки твердого остатка пиролизованной шины, показал, что в настоящее время используется как физическое воздействие, так и реагентная обработка. Последняя [20, 21], позволяет вводить различные функциональные группы на поверхности, позволяющие сорбировать тяжелые металлы без применения экстремально высоких температур. Например, если активация углей абрикосовых косточек и кокосовой скорлупы паром при температуре 800-1000°С приводила к образованию на поверхности карбоксильных, гидроксильных и фенольных функциональных групп [22], то те же функциональные были получены на поверхности углеродного материала, полученного из стеблей лотоса, путем обработки раствором фосфорной кислоты и пентаэритрита [23] и последующей активации при 450°С.

Цель данного исследования – установить механизм сорбции ионов никеля на активированном угле, полученного из твердого остатка пиролизованных шин, после его реагентной обработки.

Методология. В качестве объекта исследования использован твердый остаток пиролиза изношенных шин, получаемый на установке «Фортан – М». Очистку и активацию полученного остатка (далее – угля), предварительно измельченного до фракции с размерами частиц от 1 мм до 2 мм, проводили последовательно в несколько этапов. На первом этапе 10 грамм твердого остатка пиролиза шин обрабатывали в 100 см^3 35%-ной соляной кислоте и затем промывали дистиллированной водой до достижения 5 *pH*. На втором этапе твердый остаток обрабатывали в 150 см^3 разбавленной водой (1:1) азотной кислотой при температуре 200°С в течении 30 минут и затем промывали дистиллированной водой до 5 *pH*. На третьем этапе обрабатывали в 100 см^3 10%-го раствора гидроксида натрия при воздействии ультразвука в течении 2 минут, в ультразвуковой ванне, мощность ультразвука 60 Вт, частота 40 кГц. Далее полученный уголь промывали дистиллированной водой до достижения 5 *pH*. На заключительном этапе уголь сушили в сушильном шкафе при температуре 105°С до достижения постоянной массы.

Процесс сорбции проводили в модельных растворах с различной концентрацией ионов никеля, в статических условиях при температуре 25°С, водородном показателе среды 4 *pH* и постоянном перемешивании с применением 1 г активированного угля, подготовленного вышеописанным способом. Водородный показатель *pH* растворов контролировали раствором азотной кислоты концентрации 0,3 *M* и раствором гидроксида натрия концентрации 1,0 моль/дм^3. Модельные растворы готовили из государственных стандартных образцов (ГСО) ионов никеля (II) с исходной концентрацией 1,133 мг/дм^3; 3,110 мг/дм^3; 5,466 мг/дм^3.

Процесс сорбции проводили в течении 2 часов. Пробоотбор осуществляли через каждые 15 минут. В пробирки объемом 25 см^3 дозатором помешалась проба объемом 0,2 см^3 и доводилась объем до 10 см^3 раствором азотной кислоты концентрации 0,1 *M*. Полученный раствор пропускали через фильтр синяя-лента в коническую колбу объемом 25 см^3 и в фильтрате определяли концентрацию ионов никеля (Ni^{2+}) атомно-абсорбционным спектрометром марки «Квант – 2 мт» в режиме пламенной атомизации в соответствии с методикой ПНДФ 14.1:2:4.214-06.

Количество Ni^{2+}, сорбированного в момент времени *t*, 1 г активированного угля, рассчитывали по формуле:

$$q_t = (C_0 - C_t)V/m, \quad (1)$$

где q_t – адсорбционное равновесие (сорбционная ёмкость по отношению Ni^{2+}), мг/г; C_0 – исходная концентрация Ni^{2+} в модельном растворе, мг/дм^3; C_t – концентрация Ni^{2+} в момент времени *t* в модельном растворе, мг/дм^3; *V* – объем модельного раствора, дм^3; *m* – масса активированного угля, г.

Эффективность сорбции Ni^{2+} в момент времени *t* определяли по формуле:

$$Э = (C_0 - C_t) / C_0 \cdot 100\% \quad (2)$$

где C_0 – исходная концентрация Ni^{2+} в модельном растворе, мг/дм^3; C_t – концентрация Ni^{2+} в момент времени *t* в модельном растворе, мг/дм^3.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 показано изменение концентрации адсорбтива C_e в модельном растворе с течением времени *t*. Как видно из рисунка 1, наибольшее извлечение ионов Ni^{2+} из модельных растворов происходит через 60 минут с начала контакта с активированным углем.

Кинетическая кривая сорбции, т.е. зависимость величины адсорбции q_t от времени *t*, позволяет установить время наступления равновесия в растворе, что необходимо для корректного построения изотермы адсорбции и оценить целесообразность применения адсорбента для решения практических задач. Кинетическая кривая сорбции никеля представлена на рисунке 2.

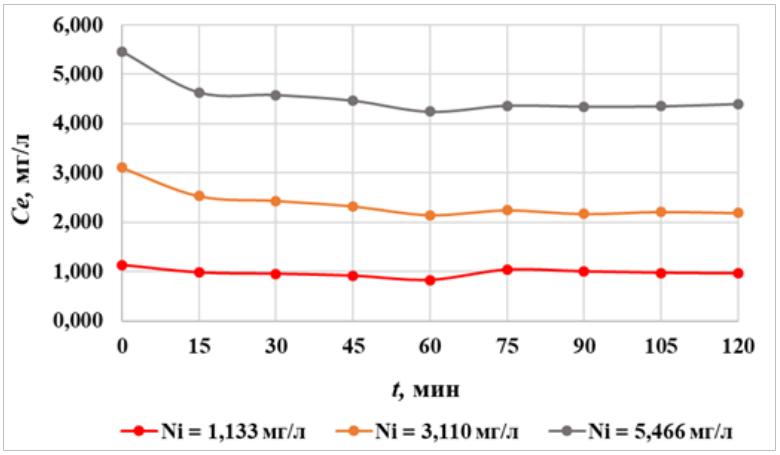


Рисунок 1 – Изменение концентрации адсорбтива C_e в модельном растворе с течением времени t

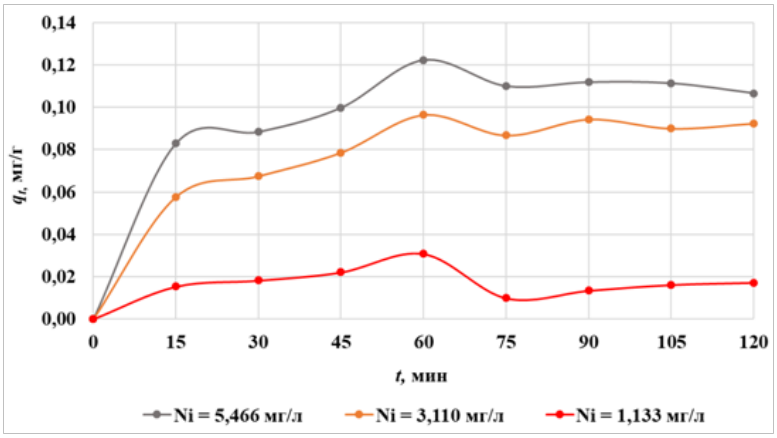


Рисунок 2 – Кинетическая кривая сорбции ионов Ni^{2+}

Видно, что сорбция ионов Ni^{2+} протекает наиболее быстро в первые 15 минут, а затем замедляется с течением времени, приближаясь к состоянию равновесия через 60 минут.

Анализ кинетических кривых сорбции моделями диффузионной и химической кинетики позволяет определить механизм сорбции и выявить лимитирующие стадии процесса.

Для оценки вклада внешней и внутренней диффузии на скорость процесса сорбции применены модели Бойда, Бойда-Адамса-Майерса и Вебера-Морриса. Кинетические кривые в координатах соответствующих уравнений приведены на рисунках 3 и 4.

Согласно кинетической модели Бойда-Адамса-Майерса, если зависимость $B_t = f(t)$ является линейной и проходит через начало координат, то диффузия в порах сорбента ограничивает скорость сорбции. Если одно из этих условий не выполняется, скорость процесса будет ограничена пленочной диффузией [24, 25].

Из анализа данных, представленных на рисунках 3*а* и 3*б* видно, что коэффициенты детерминации (R^2) для модели внутренней диффузии близки к единице, а для модели внешней диффузии R^2 ниже, это может указывать на то, что стадия внутренней диффузии является более значимым фактором, и ограничивает скорость сорбции.

На это же указывает и то, что в начале сорбции, рисунок 2, вначале наблюдается быстрая скорость сорбции Ni^{2+}, а затем ее замедление. Это свидетельствует о том, что ионы Ni^{2+} быстро доставляются к поверхности сорбента за счет процесса внешней диффузии, но дальнейшая их сорбция ограничивается скоростью процесса внутренней диффузии.

Видно, что при низких концентрациях Ni^{2+} (1,133 мг/л и 3,110 мг/л) экспериментальные данные хорошо описываются моделью внешней диффузии. Это объясняется относительно малым количеством ионов Ni^{2+} в растворе, в результате чего внешняя диффузия становится основным механизмом переноса Ni^{2+} к поверхности сорбента. При дальнейшем увеличении концентрации Ni^{2+} происходит быстрое насыщение поверхности сорбента, после чего внутренняя диффузия (проникновение Ni^{2+} внутрь пор) и другие механизмы (например, взаимодействие с активными центрами) начинают играть более значимую роль. В результате, внешний механизм больше не является основным лимитирующим процессом и модель внешней диффузии утрачивает свою применимость, что и отражается низкими значениями R^2 в модельных растворах с концентрацией ионов никеля 5,466 мг/л.

Кинетическая модель Вебера-Морриса позволяет определить механизмы, контролирующие скорость сорбции с помощью анализа зависимости количества сорбированного вещества q_t от квадратного корня времени сорбции $t^{0,5}$. Согласно этой модели, скорость сорбции может ограничиваться внешней диффузией через пограничный слой, внутренней диффузией внутри пор сорбента или обоими механизмами одновременно. Если зависимость $q_t = f(t^{0,5})$ прямолинейна и проходит через начало координат, то скорость сорбции контролируется только внутридиффузионными процессами [26, 27]. Если зависимость $q_t = f(t^{0,5})$состоит из нескольких прямолинейных участков, это свидетельствует о воздействии на скорость сорбции двух или нескольких процессов [28]. В рамках данной модели, сорбция пропорционально квадратному корню от времени:

$$q_t = k_{id}\sqrt{t} + C \quad (3)$$

где k_{id} – константа скорости внутренней диффузии, мг/г·мин$^{1/2}$; C – константа, связанная с толщиной пограничного слоя, мг/г.

Нулевое значение C на линейном графике зависимости $q_t = f(t^{0,5})$ указывает на то, что скорость сорбции ограничивается только диффузией внутри частиц сорбента. В противном случае, кроме внутренней диффузии в разной степени, в процесс сорбции могут влиять другие механизмы, такие как электростатическое взаимодействие или ионный обмен [29].

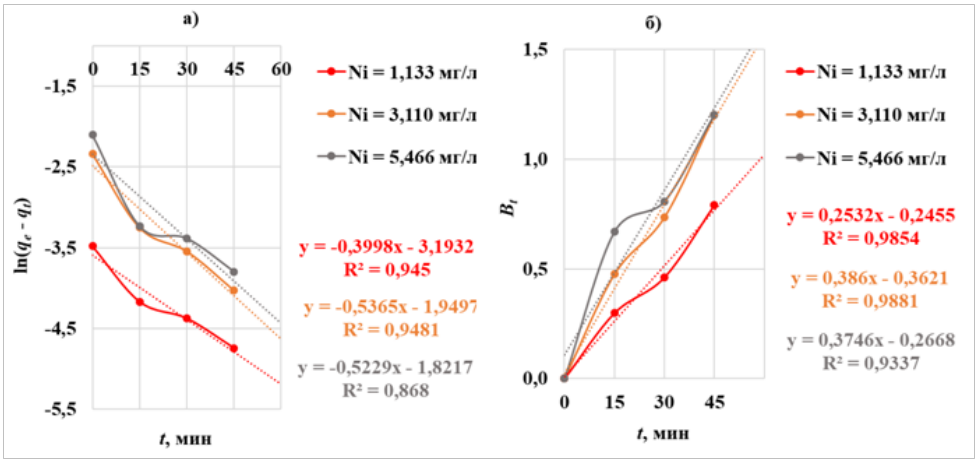


Рисунок 3 – Кинетические кривые сорбции в координатах уравнения:
Бойда (а) для внешней (пленочной) диффузии; Бойда-Адамса-Майерса (б) для диффузии внутри адсорбента

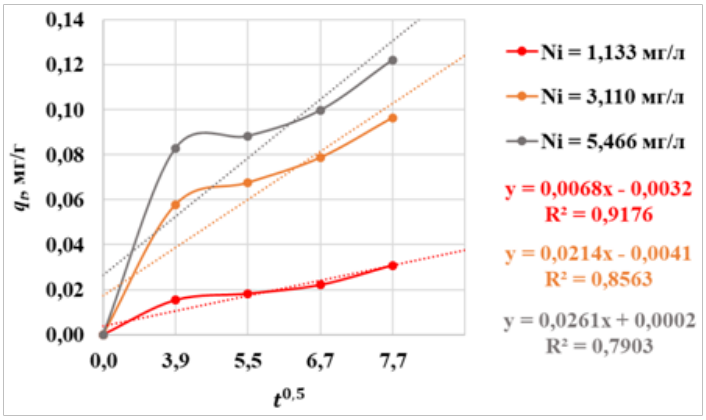


Рисунок 4 – Кинетические кривые сорбции в координатах уравнения Вебера-Морриса

Из представленных на рисунке 4 данных видно, что зависимости не линейны и состоят из нескольких прямолинейных участков, что свидетельствует о воздействии на скорость сорбции двух или нескольких процессов. Ненулевое значения констант C так же подтверждает. При высоких концентрациях Ni^{2+} внутренняя диффузия протекает относительно быстро на это указывают константы скорости k_{id}. При низких концентрациях Ni^{2+}, медленная скорость внутренней диффузии очевидно является следствием меньшего градиента концентраций, уменьшающего движущую силу диффузии. Исходя из этого можно предположить, что сорбция ионов Ni^{2+} протекает по смешанно-диффузионному механизму, когда скорость сорбции однозначно не может ограничиваться внешней или внутренней диффузией.

Для анализа кинетических кривых сорбции никеля использовали модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка, первая из которых описывала процесс, лимитируемый диффузией, а вторая, про-

цесс, лимитируемый химической реакцией обмена (рис. 5). Кроме того, для оценки вклада десорбции в кинетику извлечения никеля, увеличивающегося при приближении к равновесному состоянию, использовали модель Еловича, позволяющую учитывать изменение количества сорбированного вещества на поверхности с течением времени (рис. 6).

Модель псевдо-первого порядка (рис. 5*а*) удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные по сорбции ионов никеля при их исходной концентрации в растворах 1,133 и 3,110 мг/л, достигая коэффициента корреляции R^2, близкого к 0,95. Однако с увеличением исходной концентрации до 5,466 мг/л коэффициент R^2 снижается до 0,868. Это указывает на то, что данная модель не удовлетворительно описывает механизм сорбции при высоких концентрациях ионов Ni^{2+}.

Модель псевдо-второго порядка, напротив, неудовлетворительно описывает кинетические кривые сорбции при низких концентрациях ионов никеля (1,133 мг/л), но соответствует процессу, лимитируемому химической реакцией обмена при средних и высоких концентрациях ионов никеля (3,110 мг/л и 5,466 мг/л), достигая значений коэффициента корреляции (R^2) 0,94 и 0,95, соответственно.

Модель Еловича показывает высокий уровень соответствия, экспериментальным данным для всех исследованных концентраций.

Следует подчеркнуть, что уравнение псевдо-первого порядка идентично уравнению внешней диффузии Бойда, поскольку предполагает, что сорбции предшествует диффузия. В случае диффузии ионов через пленку, скорость сорбции определяется размером частиц сорбента и толщиной самой пленки. Если же лимитирующая стадия химическая реакция на поверхности сорбента, скорость процесса сорбции зависит от концентрации ионов и температурных условий [30]. Из анализа данных представленных на рисунке 5*б* видно, что с увеличением концентрации Ni^{2+} наблюдается рост R^2, что может указывать на возможное протекание химических реакций на поверхности активированного угля, подготовленного предложенного нами способом. Учитывая R^2 можно предположить, что при концентрации 5,466 мг/л протекают химические реакции второго порядка – Ni^{2+} и функциональные группы, находящиеся на поверхности сорбента, взаимодействуют между собой в соотношении 1:1 [31]. Модель псевдопервого порядка применима на начальном этапе сорбционного процесса, когда концентрация ионов сорбата, достигающих функциональных групп сорбента, крайне мала по сравнению с количеством привитых групп [32]. В связи с этим можно предположить, что при концентрации 1,133 мг/л протекают в основном химические реакции первого порядка, тогда как для концентрации 3,110 мг/л возможны реакции первого и второго порядка.

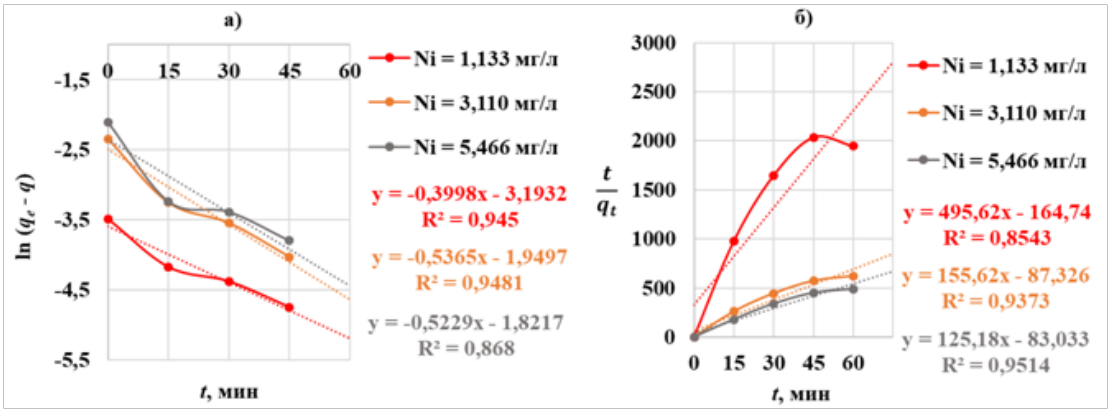


Рисунок 5 – Кинетические кривые в координатах уравнения: псевдо-первого порядка (а), псевдо-второго порядка (б)

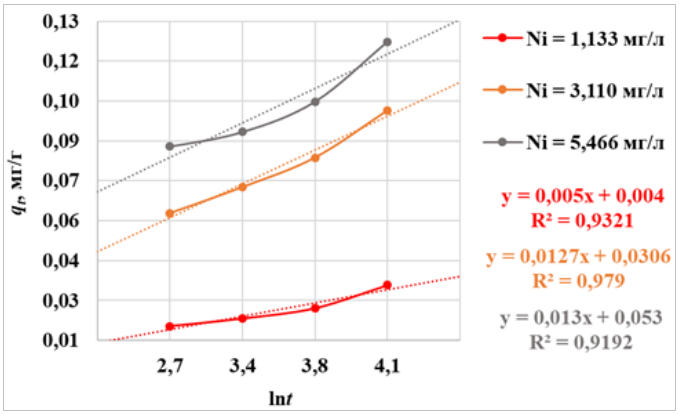


Рисунок 6 – Кинетические кривые в координатах уравнения Еловича

Полученные параметры уравнений псевдо-первого, псевдо-второго порядка и Еловича, а также скорости сорбции, рассчитанные в рамках этих моделей представлены в таблице 1.

Модель псевдо-первого порядка предполагает, что скорость сорбции пропорциональна числу свободных активных центров [33]. Исходя из этого, одной из возможных причин изменений скорости сорбции при высоких концентрациях является насыщение сорбента, после которого скорость сорбции остаётся низкой, так как количество доступных активных центров ограничено.

В рамках модели Еловича, увеличение концентрации Ni^{2+} в растворе снижает значение константы десорбции β, поскольку большее количество частиц на поверхности сорбента создаёт препятствия для десорбции.

Наблюдаемое уменьшение скорости в интервале от 15 до 30 минут, с последующим ее увеличением к 45 минутам сорбции в рамках модели псевдо-второго порядка может свидетельствовать о переходе от монослойной к полислойной сорбции, при этом верхние слои сорбированных ионов никеля облегчают доступ к подлежащим активным центрам, способствуя увеличению скорости сорбции. Вероятность полислойной сорбции подтверждает и соответствие экспериментальных данных моделям Холси (рис. 7*а*) и Дубинина-Радушкевича (рис. 7*б*).

Модель Дубинина-Радушкевича предполагает возможное образование нескольких слоев сорбата. Параметры модели Дубинина-Радушкевича рассчитывали из его линейной формы уравнения [28]:

$$ln\ q_e = ln\ q_\infty - k_D\varepsilon^2 \quad (4)$$

ε – потенциал Поляни (кДж/моль), отражающий изотермическую работу переноса одного моля сорбтива из объема равновесного раствора к поверхности сорбента и определяемый по выражению:

$$\varepsilon = RT \ln (1 + 1/C_e) \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная ($8{,}314 \cdot 10^{-3}$ кДж/(моль·К)) и T – абсолютная температура (К).

k_D – константа, связанная с характеристической энергией сорбции E:

$$E = -2k_D^{-0.5} \quad (6)$$

Значение $E<8$ кДж/моль свидетельствует о протекании физической адсорбции, при $8<E<16$ кДж/моль имеет место преимущественно хемосорбционный механизм процесса [28].

Константу k_D находили по тангенсу угла наклона прямой в координатах $ln\ q_e = f(\varepsilon^2)$. Константу q_∞ определяли по отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат [28]. Результаты расчета параметров уравнения Дубинина-Радушкевича представлены в таблице 2.

Полученное значение энергии активации E (8,8 кДж/моль) подтверждает возможное протекание сорбции ионов Ni^{2+} на поверхности предложенного сорбента по хемосорбционному механизму.

Таблица 1 – Параметры сорбции ионов никеля, рассчитанные по уравнениям псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и Еловича

Модель псевдо-первого порядка						
t, мин	Ce = 1,133 мг/л		Ce = 3,110 мг/л		Ce = 5,466 мг/л	
	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа скорости сорбции k_1, мин $^{-1}$	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа скорости сорбции k_1, мин $^{-1}$	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа скорости сорбции k_1, мин $^{-1}$
15	0,00162	0,10582	0,00810	0,14018	0,01442	0,17397
30	0,00125	0,06876	0,00625	0,09254	0,00870	0,09847
45	0,00143	0,06469	0,00681	0,08653	0,00864	0,08665
	$R^2 = 0{,}945$		$R^2 = 0{,}9481$		$R^2 = 0{,}868$	
Модель псевдо-второго порядка						
t, мин	Ce = 1,133 мг/л		Ce = 3,110 мг/л		Ce = 5,466 мг/л	
	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа скорости сорбции k_2, г · (мг · мин) $^{-1}$	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа скорости сорбции k_2, г · (мг · мин) $^{-1}$	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа скорости сорбции k_2, г · (мг · мин) $^{-1}$
15	0,0329	2,1484	0,0595	1,0310	0,0952	1,1482
30	0,0286	1,5686	0,0546	0,8080	0,0628	0,7107
45	0,0405	1,8328	0,0802	1,0191	0,0805	0,8066
	$R^2 = 0{,}8543$		$R^2 = 0{,}9373$		$R^2 = 0{,}9514$	
Модель Еловича									
t, мин	Ce = 1,133 мг/л			Ce = 3,110 мг/л			Ce = 5,466 мг/л		
	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа десорбции β, г/мг	α_t / β	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа десорбции β, г/мг	α_t / β	скорость сорбции α_t, мг/(г×мин)	константа десорбции β, г/мг	α_t / β
0	0,011	200,000	0,0000550	0,141	78,740	0,0018	0,767	76,923	0,00997
15	0,0067		0,0000335	0,081		0,0010	0,514		0,00668
30	0,0061		0,0000305	0,090		0,0011	0,377		0,00490
45	0,0091		0,0000455	0,142		0,0018	0,633		0,00823
60	0,0411		0,0002055	0,406		0,0052	2,579		0,03353
	$R^2 = 0{,}9321$			$R^2 = 0{,}979$			$R^2 = 0{,}9192$		

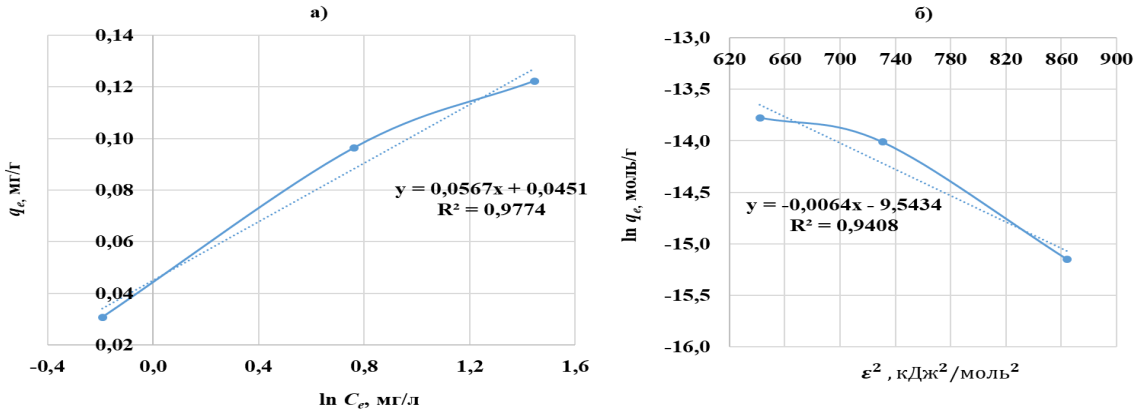


Рисунок 7 – Изотерма сорбции никеля в координатах уравнений: Холси (а) и Дубинина - Радушкевича (б)

Таблица 2 – Параметры уравнения Дубинина-Радушкевича

ε, кДж/моль	ln q_e, моль/г	$ε^2$, кДж²/моль²	E , кДж/моль
29,397	-15,15	864,185	8,8
27,031	-14,01	730,652	
25,340	-13,78	642,140	

Таким образом, в целом можно сделать вывод, что на поверхности активированного угля из твердого остатка пиролизованных шин, подготовленном выше описанным способом, сорбция протекает по хемосорбционному механизму. На это указывают высокие значения R^2 полученные при использовании уравнений псевдо-первого и псевдо-второго порядка и рассчитанный энергетический параметр *E* из уравнения Дубинина-Радушкевича. На скорость и эффективность сорбции существенное влияние оказывает концентрация ионов никеля в растворе.

Для увеличения скорости и эффективности сорбции ионов никеля на предложенном сорбенте предложено ввести на его поверхность дополнительные функциональные группы, что позволит задействовать больше активных центров для реакции, а также оптимизировать такие параметры как *pH* и температура.

Выводы. Исследован механизм сорбции ионов никеля (Ni^{2+}) на угле из твердого остатка пиролиза изношенных автомобильных шин, активированном последовательной трехступенчатой химической обработкой.

Установлено, что сорбция протекает по хемосорбционному механизму. Модель псевдо-первого порядка удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные при низких концентрациях никеля, а модель псевдо-второго порядка, удовлетворительно описывает кинетические кривые сорбции при средних и высоких концентрациях ионов никеля.

Для увеличения скорости и эффективности сорбции ионов никеля на предложенном сорбенте предложено ввести на его поверхность дополнительные функциональные группы, что позволит задействовать больше активных центров для реакции, а также оптимизировать *pH* и температуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шибека, Л.А. Очистка сточных вод от ионов никеля / Л.А. Шибека // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 24-26 ноября 2010. – Минск: БГТУ, 2010. – Ч. 2. – С. 412-415.

2. Останин А.Н., Шемель И.Г. Эколого-экономические аспекты технологии извлечения никеля из отработанных растворов химического никелирования // European Student Scientific Journal. – 2015. – № 1.

3. Веденяпина М.Д., Курмышева А.Ю., Кулайшин С.А., Кряжев Ю.Г. Адсорбция некоторых тяжелых металлов на активированных углях (обзор)// Химия твердого топлива. – 2021. – № 2. – С. 18-41.

4. Abbas M.N., Al-Madhhachi A.-S.T., Esmael S.A. // Int. J. Hydro. Sci. Technol. – 2019. – V. 9. – № 5. – P. 550.

5. Altmann J., Ruhl A.S., Zietzschmann F., Jekel M. // Wa ter Res. – 2014. – V. 55. – P. 185.

6. Новичков Ю.А. Повышение экологической безопасности рециклинга автотракторных шин. Дис. канд. техн. наук. Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. 2018. – 172 с.

7. Дудникова Ю.Н., Касьянова О.В. Исследования элементного состава и морфологии поверхности углеродистого твердого остатка пиролиза вышедших из употребления резинотехнических изделий // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: IV Всероссийская конференция. Кемерово: КузГТУ. 2018. – С. 305.1-305.5.

8. Минхайдарова Г.В. Экологические аспекты утилизации твердого углеродного остатка пиролиза изношенных шин. Дис. канд. техн. наук. Казань: КХТИ. 2004. – 155 с.

9. Айнуллов Т.С., Якупов Р.Р., Ларионов К.Б. Способ деминерализации углеродного остатка пиролиза отработанных шин. Патент № 2799204 C1. Кл. МПК C08J 11/00, B29B 17/00. – 2022.

10. Сивакова Л.Г., Касьянова О.В. Смачивание твердого остатка пиролиза вышедших из употребления резинотехнических изделий растворами ПАВ // Вестник КузГТУ. – 2018. – №6 (130). – С. 70-75.

11. Минхайдарова Г.В. Экологические аспекты утилизации твердого углеродного остатка пиролиза изношенных шин. Дис. канд. техн. наук. Казань: КХТИ. 2004. – 155 с.

12. Петраков Виталий Дмитриевич, Тыра Анна Валерьевна, Ушаков Константин Юрьевич Твёрдый остаток процесса термообработки крупногабаритных шин как сорбент для очистки сточных вод предприятий // Экологический вестник Донбасса. – 2022. – №7.

13. Макаревич, Евгения Анатольевна. Разработка научных основ процессов переработки твердого углерод-

содержащего остатка пиролиза резинотехнических изделий: диссертация ... кандидата технических наук: 2.6.12. / Макаревич Евгения Анатольевна; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»; Диссовет РХТУ.2.6.02]. – Кемерово, 2024. – 152 с.: ил.

14. Углеродные сорбенты из крупногабаритных шин / Ч.Н. Барнаков, Г.П. Хохлова, С.Н. Вершинин, А.В. Самаров // Кокс и химия. – 2015. – № 4. – С. 47-50. – EDN TTZYRP.

15. Сазонов, В.А. Технология производства активного угля из резиновой крошки изношенных автомобильных шин / В.А. Сазонов, В.Ф. Олонцев, Е.А. Сазонова // Экология и промышленность России. – 2011. – № 6. – С. 4-5. – EDN NWCDXL.

16. Azmi, Nur & Lau, Kam Sheng & CHIN, Siew Xian & Zakaria, Sarani & Chowdhury, Shahariar & Chia, Chin-hua. (2023). Study on Effect of Toluene-Acid Treatments of Recycled Carbon Black from Waste Tyres: Physico-Chemical Analyses and Adsorption Performance. Sains Malaysiana. 52. 2689-2697. 10.17576/jsm-2023-5209-17.

17. Aslam N, Khawaja A, Shahid Y and Awan JA. Acid Base Demineralization of Pyrolytic Carbon Black Obtained From Waste Rubber. Austin Chem Eng. 2018; 5(1): 1059.

18. Ferrer, V., Grandón, H., Segura, C. et al. Demineralization strategies of carbon black derived from pyrolysis of waste tires. J Mater Cycles Waste Manag 27, 408-419 (2025). https://doi.org/10.1007/s10163-024-02120-4.

19. Martínez JD, Cardona-Uribe N, Murillo R, García T, López JM. Carbon black recovery from waste tire pyrolysis by demineralization: Production and application in rubber compounding. Waste Manag. 2019;85:574-584. doi:10.1016/j.wasman.2019.01.016.

20. Vural, U. S., & Yinanç, A. (2024). Improved demineralization of the carbon black obtained from the pyrolysis of the sidewall and tread of scrap Tires: Extraction of some micro-/macro-nutrient elements of plants. Environmental Research and Technology, 7(3), 347-355. https://doi.org/10.35208/ert.1358852.

21. Lillo-Ródenas, M.A., Cazorla-Amorós, D. and Linares-Solano, A. (2003) Understanding Chemical Reactions between Carbons and NaOH and KOH: An Insight into the Chemical Activation Mechanism. Carbon, 41, 267-275. https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00279-8.

22. Hu, C. Effect of chemical activation of an activated carbon using zinc chloride on elemental mercury adsorption / C. Hu, J. Zhou, S. He et al. // Fuel Processing Technology. – 2009. – V. 90. – P. 812-817. – DOI: 10.1016/j.fuproc.2009.03.020.

23. Liu, H. Preparation of activated carbon from lotus stalks with the mixture of phosphoric acid and pentaerythritol impregnation and its application for Ni(II) sorption / H. Liu, X. Wang, G. Zhai et al. // Chemical Engineering Journal. – 2012. – V. 209. – P. 155-162. – DOI: 10.1016/j.cej.2012.07.132.

24. Кузнецова Т.С., Бураков А.Е., Ананьева О.А., Буракова И.В., Меметова А.Е., Яркин В.О., Ткачев А.Г. Кинетика сорбции свинца из водных растворов на наноструктурированном криогеле, модифицированном органическими полимерами // Коллоидный журнал. – 2024. – Т. 86. – №3. – С. 357-367. doi: 10.31857/S0023291224030056.

25. Datsko, Tatiana & Zelentsov, V.. (2023). Kinetic and Adsorption Mechanism of Methylene Blue by Nanocomposite TiO2/Diatomite and Its Components. Elektronnaya Obrabotka Materialov. 59. – P. 46-54. 10.52577/eom.2023.59.3.46.

26. Годаев, Б.С. Кинетика удаления Cu(II) из водного раствора с использованием нанокомпозита Fe3O4/C / Б.С. Годаев, В.В. Козлов // Chemical Bulletin. – 2023. – Т. 6, № 1. – С. 5-12. – EDN ZTEIVS.

27. Скугорева, С.Г. Биосорбция тяжёлых металлов микромицетами: особенности процесса, механизмы, кинетика / С.Г. Скугорева, Г.Я. Кантор, Л.И. Домрачева // Теоретическая и прикладная экология. – 2019. – № 2. – С. 14-31. – DOI 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031. – EDN UVMUSD.

28. Конькова Т.В. Теория и практика жидкофазной адсорбции в технологии неорганических веществ / Т.В. Конькова, А.П. Рысев. − М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2022. – 120 с.

29. Demiral, H., & Güngör, C. (2016). Adsorption of copper(II) from aqueous solutions on activated carbon prepared from grape bagasse. Journal of Cleaner Production, 124, 103–113. doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.084

30. Дремичева, Е.С. Моделирование процесса сорбции при очистке сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов / Е.С. Дремичева, А.Г. Лаптев // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53, № 3. – С. 267-275. – DOI 10.1134/S0040357119030047. – EDN ZDEJQT.

31. Липин В.А., Евдокимов А.Н., Суставова Т.А., Петрова Ю.А. Кинетика и равновесная сорбция катиона Cu2+ полиамфолитными гидрогелями на основе гидролизованного полиакриламида и алифатических диаминов // Журнал физической химии. – 2022. – Т. 96. – № 3. – С. 438-441.

32. Физико-химические и адсорбционные свойства модифицированных полисилоксанов, синтезированных «золь-гель» методом. часть 1. Кинетика сорбционного извлечения платины(iv) полисилоксанами / Неудачина Л.К.,Голуб А.Я.,Ятлук Ю.Г. // Бутлеровские сообщения. – 2011. – V. 27, l. 14. – P. 55-68.

33. Gupta, P., Nagpal, G. & Gupta, N. Fly ash-based geopolymers: an emerging sustainable solution for heavy metal remediation from aqueous medium. Beni-Suef Univ J Basic Appl Sci 10, 89 (2021). https://doi.org/10.1186/s43088-021-00179-8.

Статья поступила в редакцию 25.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.453
EDN: FZETQS

ОБОСНОВАНИЕ ПОНЯТИЯ «РАЗВЕТВЛЁННЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ» ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 8038-6529
AuthorID: 1175504
ORCID: 0009-0006-9884-9687

ДЮКИН Ильяс Рафаилевич, аспирант
Вятский государственный агротехнологический университет
(610017, г.Киров, Октябрьский пр-т, 133, e-mail: lester0125@yandex.ru)

SPIN: 9644-3877
AuthorID: 119295

СИДОРОВ Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой БЖД
Южно-Уральский государственный университет
(454080 Челябинск, проспект Ленина, 76, e-mail: sidorovai@susu.ru)

SPIN: 5350-3579
AuthorID: 689956
ORCID: 0000-0002-8325-1598
ScopusID: 57204675457

БОГДАНОВ Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор
Южно-Уральский государственный университет
(454080 Челябинск, проспект Ленина, 76, e-mail: avbogdanov@susu.ru)

Аннотация. Статья посвящена вопросам обеспечения безопасности труда в электроэнергетике и аграрно-промышленном комплексе при эксплуатации воздушных линий (ВЛ) 6-10 кВ, составляющих основу распределительных сетей Российской Федерации, особенно в сельских и малонаселённых районах. Эти сети характеризуются значительной протяжённостью, высокой степенью разветвлённости, большим количеством отпаек и ограниченными ресурсами обслуживающего персонала, что осложняет оперативное обслуживание и увеличивает профессиональные риски. В исследовании основное внимание уделено сельским сетям филиалов ПАО «Россети Центр» и «Россети Центр и Приволжье», где однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются наиболее распространённым типом повреждений. Проведён анализ статистических данных по аварийным отключениям, техническим характеристикам ВЛ, показателям отказов и особенностям эксплуатации в сельской местности. Достигнута цель: впервые в научной литературе дано определение понятию разветвлённой распределительной электрической сети, учитывающее её топологические и эксплуатационные особенности, влияющие на сложность локализации повреждений. Установлено, что структура таких сетей существенно затрудняет оперативное выявление места ОЗЗ, особенно в удалённых сельских районах, где задержки в обнаружении повреждений повышают риск несчастных случаев среди персонала, а также могут приводить к травмированию или смерти сельскохозяйственных животных. В статье обоснована необходимость разработки переносного устройства нового типа, позволяющего точно определять место замыкания и заблаговременно информировать персонал об опасном приближении к опасной зоне растекания, образующейся в месте замыкания на землю. Предложенные решения направлены на повышение электробезопасности, снижение временных и трудовых затрат на устранение аварий, а также минимизацию травматизма при обслуживании распределительных электрических сетей 6-10 кВ в сельской местности.

Ключевые слова: безопасность труда, воздушные линии, распределительная сеть, поток отказов, однофазное замыкание на землю, аварийность, безопасность персонала.

SUBSTANTIATION OF THE CONCEPT OF "EXTENSIVE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS" TO IMPROVE THE LEVEL OF OCCUPATIONAL SAFETY DURING THE OPERATION OF OVERHEAD LINES

© The Author(s) 2025
DYUKIN Ilyas Rafailevich, post-graduate student
Vyatka State Agrotechnological University
(610017, Kirov, Oktyabrsky ave., 133, e-mail: lester0125@yandex.ru)
SIDOROV Alexander Ivanovich, doctor of engineering sciences, professor,
head of the Department of Occupational Safety and Health
South Ural State University
(454080, Chelyabinsk, Lenin Prospect, 76, e-mail: sidorovai@susu.ru)
BOGDANOV Andrey Vladimirovich, doctor of engineering sciences, professor

South Ural State University
(454080, Chelyabinsk, Lenin Prospect, 76, e-mail: avbogdanov@susu.ru)

Abstract. The article is devoted to topical issues of ensuring occupational safety in the electric power industry and the agro-industrial complex during the operation of overhead lines (overhead lines) of 6-10 kV, which form the basis of distribution networks in the Russian Federation, especially in rural and sparsely populated areas. These networks are characterized by significant length, a high degree of branching, a large number of solder joints and limited resources of service personnel, which complicates operational maintenance and increases professional risks. The study focuses on the rural networks of the branches of PJSC Rosseti Center and Rosseti Center and Volga Region, where single-phase earth faults are the most common type of damage. The analysis of statis-tical data on emergency shutdowns, overhead line technical characteristics, failure rates and operating characteristics in rural areas is carried out. Goal achieved: for the first time in the scientific literature, the concept of an extensive electrical distribution network has been defined, taking into account its topological and operational features that affect the complexity of damage localization. It has been established that the structure of such networks significantly complicates the rapid identification of the location of the mine, especially in remote rural areas, where delays in damage detection increase the risk of accidents among personnel, and can also lead to injury or death of farm animals. The article substantiates the need to develop a portable device of a new type that makes it possible to accurately determine the location of a fault and inform personnel in advance about a dangerous approach to a dangerous spreading zone formed at the site of an earth fault. The pro-posed solutions are aimed at improving electrical safety, reducing time and labor costs for eliminating accidents, as well as minimizing injuries during maintenance of 6-10 kV distribution pow-er grids in rural areas.

Keywords: labor safety, overhead lines, distribution network, fault flow, single-phase earth fault, emergency, personnel safety.

Для цитирования: *Дюкин И.Р. Обоснование понятия «разветвлённые распределительные электрические сети» для повышения уровня безопасности труда при эксплуатации воздушных линий / И.Р. Дюкин, А.И. Сидоров, А.В. Богданов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 267-274. – EDN: FZETQS.*

Введение. В современной электроэнергетике Российской Федерации особую значимость приобретает обеспечение безопасности труда при эксплуатации распределительных электрических сетей, особенно в условиях повышенной аварийности и износа инфраструктуры. Единая энергетическая система РФ охватывает свыше 2,5 миллионов километров линий электропередачи (ЛЭП), включая все классы напряжения. При этом распределительные сети в 95% случаев представлены воздушными линиями (ВЛ). Наиболее распространенными в отечественной энергосистеме являются ВЛ с номинальным напряжением 6-35 кВ, которые формируют основу распределительной сети страны. Эти линии имеют разветвленную древовидную структуру и значительную протяженность, которая составляет более половины от общей длины всех ЛЭП. В рассматриваемой группе распределительных сетей именно сети напряжением 10 кВ преобладают, составляя свыше 80% общей протяжённости всех ВЛ. [1].

Распределительные электрические сети 6-35 кВ обеспечивают непосредственное снабжение электроэнергией потребителей, а также перераспределение электроэнергии между подстанциями в пределах определенного района электропотребления.

Основной объем электроэнергии, передаваемой по ВЛ 6-35 кВ, потребляется сельскохозяйственными предприятиями и предприятиями по добыче нефти и газа. Такие сети характеризуются наличием многочисленных ответвлений. Однако сравнительно слабая изоляция сетей данного класса напряжения обусловливает повышенный уровень аварийности и высокий риск электротравматизма среди обслуживающего персонала [1, 2].

Воздушные линии электропередачи напряжением 6-10 кВ обладают значительной длиной и сложной топологией, ограниченной доступностью данных о режимах нагрузки, а также характеризуются высокой частотой аварийных и плановых отключений. Большинство таких линий построены по радиальной схеме с ответвлениями и включают конструктивные элементы, имеющие низкий уровень надежности (например, алюминиевые провода малого сечения, опоры с недостаточной механической прочностью и пр.), что существенно осложняет условия безопасной эксплуатации. Диаметр проводов постепенно уменьшается по мере удаления от головных участков к потребителям. По данным филиала «Кировэнерго» ПАО «Россети Центр и Приволжье», средняя протяженность магистральных линий немногим превышает 15 км, при этом длина отдельных отпаек может достигать 6 км. На сегодняшний день часть распределительных сетей 6-10 кВ не отвечает нормативным критериям надёжности электроснабжения и требуемым показателям качества электроэнергии. Дополнительно, высокий уровень износа электрооборудования и снижение эксплуатационной надёжности сетевых элементов способствуют увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций и, как следствие, росту показателей электротравматизма [2, 6-8].

Конфигурация таких сетей преимущественно

разомкнутая (рис. 1), реализуемая по радиальному или магистральному принципу с питанием от одного-двух центров питания (рис. 2, 3). В особых случаях, характерных для городских электросетей, возможно сооружение замкнутых конфигураций, однако их эксплуатация ведется в разомкнутом режиме.

Отличительной особенностью распределительных сетей, особенно работающих на напряжениях 6-10 кВ, является высокая степень разветвленности. Кроме того, они характеризуются чрезвычайно большой суммарной длиной линий электропередачи, что обусловлено необходимостью охвата значительных территорий с многочисленными потребителями.

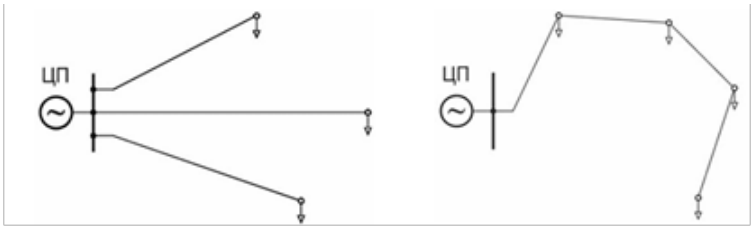


Рисунок 1 – Радиальная и магистральная конфигурации сети

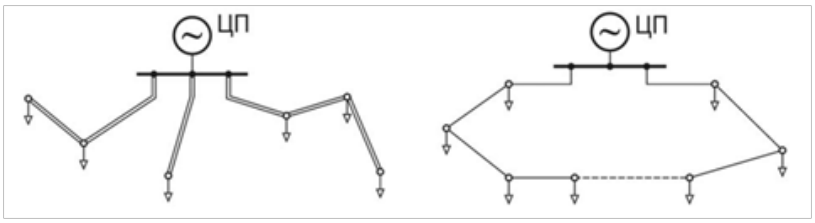


Рисунок 2 – Радиально-магистральная и замкнутая кольцевая конфигурация сети

Рисунок 3 – Сеть с двусторонним питанием

Правильное понимание термина «разветвлённая распределительная электрическая сеть» является актуальным для безопасной эксплуатации (при планировании ремонтов и переключений), так и для обнаружения однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) (для точной локализации места повреждения из-за большой длины линий и множественных отпаек). Несмотря на то, что в нормативных документах (ПУЭ, ПТЭ, ГОСТ) отсутствует чёткое определение данного термина, оно имеет существенное практическое значение.

Выполнить анализ технических характеристик и статистических данных по повреждаемости ВЛ 6-35 кВ для филиалов ПАО «Россети Центр» и «Россети Центр и Приволжье». На основании проведенного анализа обосновать и ввести понятие разветвленной распределительной электрической сети для разработки переносного прибора, предназначенного для поиска опасного для людей и сельскохозяйственных животных места ОЗЗ, а также для предупреждения обслуживающего персонала о приближении к опасной зоне. Работа направлена на разработку современного и безопасного метода определения места ОЗЗ и повышение как оперативности устранения аварий (защита временем), так и уровня электробезопасности и охраны труда на предприятиях энергетики в целом.

Методология. Техническое состояние распределительных сетей вызывает серьезные опасения: более 70% оборудования изношено как физически, так и морально, так как его средний срок эксплуатации составляет 25-30 лет. Это приводит к значительным экономическим потерям, вызванных повреждениями на линиях электропередачи [2, 3]. Современное состояние распределительных электрических сетей требует значительных мер по модернизации [15, 16].

По опубликованным данным, порядка 85-90% всех инцидентов, связанных с нарушением работы электрических сетей, происходит именно на линиях 6-35 кВ. Среди них наиболее подвержены повреждениям сельские распределительные сети 10 кВ, на долю которых приходится до 70% всех аварийных случаев [2, 3, 17-24].

К основным показателям надёжности, характеризующим уровень аварийности электрических сетей, относится поток отказов ВЛ. Методика определения данного показателя изложена в нормативном документе РД 34.20.574 «Указания по применению показателей надёжности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками» и определяется следующим образом:

$\omega_0 = (n \cdot 100)/ L_\Sigma$, год$^{-1}$ / 100 · км (1)

где n – число аварийных отключений ВЛ, ед.;

L_Σ – суммарная протяженность ВЛ, км.

Для вычисления необходимых параметров были использованы сведения из специализированного программного комплекса «Аварийность», эксплуатируемого в филиалах ПАО «Россети Центр» и «Россети Центр и Приволжье». В анализ включены данные об аварийных и плановых отключениях за период 2018-2021 гг. (табл. 1). Дополнительная информация о протяжённости и количестве ВЛ 6-10 кВ была взята из [3], а также по документам стратегической коллегии электросетевых предприятий 2022 года.

Таблица 1 – Статистические данные по отключениям ВЛ 6-10 кВ

Филиал	Количество аварийных отключений, 1/год	Суммарная протяженность ВЛ, км	Количество ВЛ	Поток отказов ω_0, год$^{-1}$ / 100 · км
Белгородэнерго	926	18467	1432	5,0
Брянскэнерго	779,5	-	-	-
Владимирэнерго	727,5	10220	-	7,1
Воронежэнерго	708	20800,5	1471	3,4
Ивэнерго	935	6618,97	689	14,1
Калугаэнерго	861	13614,21	963	6,3
Кировэнерго	2644	19558,27	1158	13,5
Костромаэнерго	839,5	10149,7	846	8,3
Курскэнерго	381	15620,1	1568	2,4
Липецкэнерго	641	-	-	-
Мариэнерго	129	5834,54	347	2,2
Нижновэнерго	2512,5	22756,2	1601	11,0
Орелэнерго	637,5	12353,3	720	5,2
Рязаньэнерго	1437,5	14015,4	1091	10,3
Смоленскэнерго	784,5	18736,57	1363	4,2
Тамбовэнерго	417,5	12065,63	1069	3,5
Тверьэнерго	2451	-	-	-
Тулэнерго	1823,5	14016,6	1168	13,0
Удмуртэнерго	2187	12957	1164	16,9
Ярэнерго	1318,5	13179,13	767	10,0

Результаты и обсуждение. По данным [3], наибольшее количество отключений ВЛ 6-10 кВ зафиксировано в филиалах Кировэнерго, Нижновэнерго, Тверьэнерго и Удмуртэнерго. Наибольшая протяженность и наибольшее количество ВЛ 6-10 кВ – в филиале Нижновэнерго.

Высокая частота отказов ВЛ связана с неблагоприятными условиями эксплуатации, включая грозовые и ветровые нагрузки, обледенение и различные механические повреждения. В сетях Кировской области в 2024 году в среднем фиксировалось 15 аварийных отключений на каждые 100 км ВЛ 10 кВ. Воздушные линии электропередачи напряжением 6-10 кВ подвержены воздействию различных внешних факторов, что приводит к следующим наиболее распространенным видам повреждений: пробои изоляторов, обрывы проводов, разрушение и падение опор. Дополнительными причинами аварийности являются несанкционированная вырубка деревьев в охранной зоне ЛЭП посторонними лицами, а также механические повреждения опор и проводов, вызванные автотранспортом сторонних организаций или сельскохозяйственной техникой (различные комбайны, тракторы и грузовые автомобили).

Анализ статистики аварийных отключений ВЛ 6-10 кВ за 2018-2024 годы свидетельствует о нарастающем количестве инцидентов в распределительных сетях, принадлежащих филиалам ПАО «Россети Центр» и «Россети Центр и Приволжье» (рис. 4). В распределительных сетях Кировской области также отмечается тенденция к росту числа аварийных отключений ВЛ 6-10 кВ (рис. 5), что подчеркивает необходимость проведения комплексных мероприятий по обеспечению безопасности эксплуатации электросетевого хозяйства и его модернизации.

Одна из самых распространенных причин повреждений ВЛ электропередачи напряжением 6-35 кВ являются ОЗЗ, которые составляют до 70% от общего числа зафиксированных инцидентов [1]. Согласно требованиям Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ) [4], сети с изолированной нейтралью допускается эксплуатировать при наличии ОЗЗ до момента их устранения, однако устранение повреждения должно осуществляться в максимально короткие сроки.

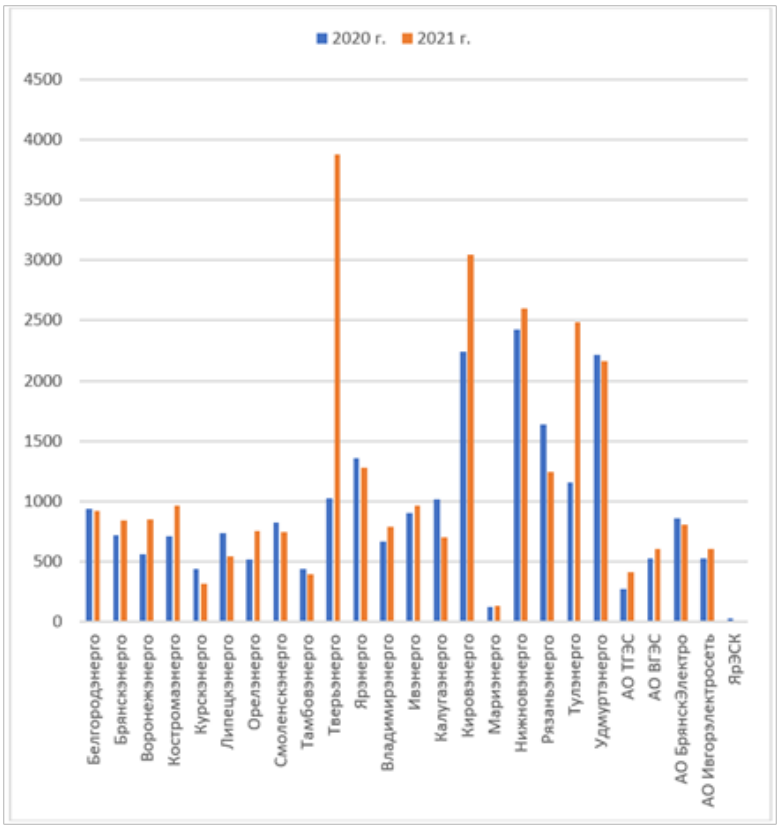


Рисунок 4 – Число аварийных отключений ВЛ 6-10 кВ ПАО «Россети

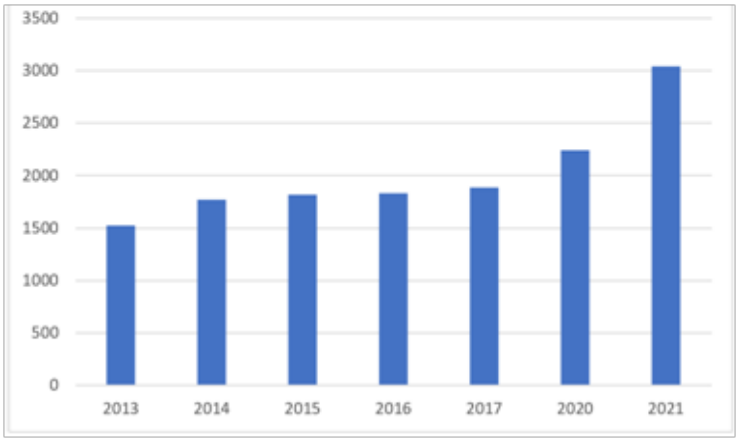


Рисунок 5 – Число аварийных отключений ВЛ 6-10 кВ в Кировской области

В случае возникновения ОЗЗ на подстанции 110/10 кВ, осуществляющей питание воздушных линий электропередачи напряжением 10 кВ, на секции сборных шин фиксируется сигнал, подтверждающий сам факт повреждения. Данные о возникшем повреждении автоматически передаются в диспетчерский центр района электрических сетей, в эксплуатационной зоне ответственности которого находится данная подстанция. После поступления сигнала диспетчер РЭС направляет оперативно-выездную бригаду (ОВБ) на подстанцию для локализации поврежденного участка ВЛ [17-24].

Время прибытия бригады зависит от удаленности объекта, которая в сельской местности может варьироваться от нескольких сотен метров до 20-40 км.

Определение поврежденного участка воздушной линии осуществляется методом последовательного отключения отходящих от подстанции ВЛ. В сетях 6-35 кВ филиала «Кировэнерго» среднее количество таких линий, отходящих от одной подстанции, составляет четыре. Локализация поврежденного участка выполняется путем объезда трассы и визуального осмотра, время которого зависит от множества факторов: сезона, погодных условий, типа рельефа (лес, поле), наличия дорог вдоль линии и других факторов.

После точного определения места повреждения принимается решение о его локализации, что включает отключение участка ВЛ с помощью

коммутационных аппаратов, установленных на секционирующих пунктах. Это позволяет восстановить электроснабжение на исправных участках сети, в том числе путем подключения резервного питания от других подстанций. Оперативные переключения могут выполняться на нескольких уровнях сети – непосредственно на подстанциях, в секционирующих пунктах и других узловых точках, что требует дополнительных передвижений ОВБ (рис. 6) [25-27].

Если для ВЛ 10 кВ, длина отпайки которой составляет 1 км, принять вероятность возникновения ОЗЗ на данной отпайке n=70% ·15·1/год · 1/100 км=0,105 1/год , то на такой отпайке ОЗЗ может случиться один раз в $T = 1/n = 1/(0{,}105 \cdot 1/\text{год}) \approx 10$ лет.

Эксплуатируемые в настоящее время на территории РФ воздушные линии электропередачи 6-10 кВ имеют, как правило, унифицированную конструкцию. Лишь в отдельных случаях проектные решения адаптированы с учётом местных особенностей [28, 29]. Приведены характеристики ВЛ 6-10 кВ некоторого РЭС филиала Кировэнерго ПАО «Россети Центр и Приволжье» (табл. 2).

Рассмотрим величину α, пропорциональную отношению средней суммарной длины всех отпаек от одной ВЛ к суммарной длине ВЛ вместе с отпайками. Эта величина будет характеризовать степень разветвленности воздушной распределительной электрической сети и определяться как отношение средней суммарной длины всех отпаек от одной ВЛ к средней длине ВЛ вместе с отпайками:

$$\alpha = 3{,}85 / 10{,}47 \cdot 100\% = 36\% \quad (2)$$

Таблица 2 – Технические характеристики ВЛ 6-10 кВ

Показатель	Ед. изм.	Значение
Количество ВЛ	шт.	78
Среднее число линий, подключённых к подстанции	шт.	4,135
Общая длина всех ВЛ	км	822,35
Средняя протяжённость линии с учетом ответвлений	км	10,47
Общая длина всех отпаек, присоединённых к одной линии	км	24,6
Среднее значение общей длины отпаек, приходящихся на линию	км	3,85
Наибольшая протяжённость отдельного ответвления	км	12,875
Среднее значение длины одного ответвления	км	0,786

Таким образом, разветвленная распределительная электрическая сеть – это радиально-магистральная электрическая сеть, образованная воздушными линиями, степень разветвленности которой превышает 30%.

В условиях разветвленной структуры воздушных линий, особенно при наличии большого числа отпаек, определение конкретного места повреждения на схеме ВЛ или на карте местности (рис. 6) представляет собой сложную задачу. Для её решения применяются различные подходы. В частности, в ряде систем мониторинга [4] используются токовые датчики, размещаемые либо в начале каждого ответвления, либо распределённые вдоль линии. Информация, поступающая с этих датчиков, интегрируется в геоинформационную систему, которая визуализирует место повреждения на карте.

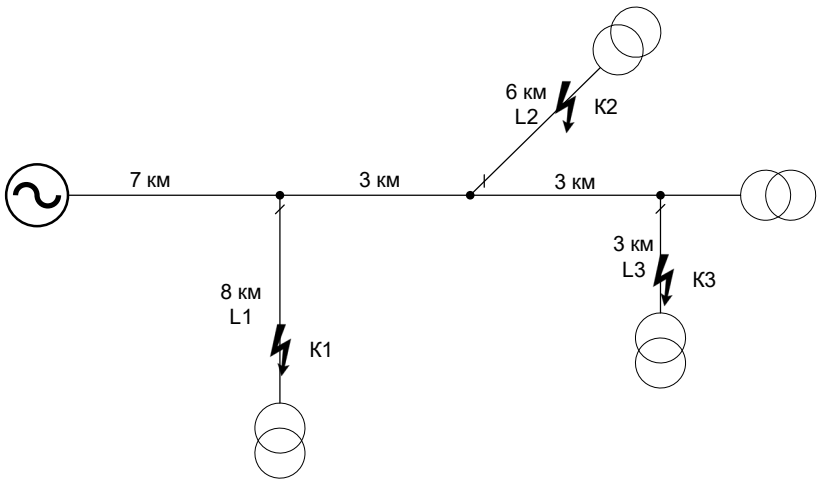


Рисунок 6 – Разветвленная распределительная электрическая сеть

В других технических решениях [5], позволяющих определять расстояние до места повреждения существует проблема выбора поврежденной отпайки, поскольку при известном значении расстояния от питающей подстанции 110/10 кВ до места повреждения нет однозначного понятия о том, на каком именно элементе ВЛ 10 кВ произошло повреждение – на магистральной части или на одной из отпаек. Например, при возникновении ОЗЗ на рассматриваемой ВЛ 10 кВ (рис. 6) на расстоянии 15 км от ее начала, персонал ОВБ сталкивается с проблемой определения места возникновения повреждения: оно могло произойти как в точке К1, так и в точках К2 и К3. При этом расстояние от

этих возможных точек повреждения до питающей подстанции одинаково, что не дает точного ответа на вопрос о том, где находится место повреждения. Для точного выявления места ОЗЗ сотрудники электросетевой компании должны самостоятельно обработать данные, полученные от устройства для определения местоположения замыкания, и на основании этого определить точный участок воздушной линии, где произошло ОЗЗ [9-11].

Особенность применения реклоузеров заключается в высокой стоимости их реализации. Для обнаружения мест ОЗЗ требуется установка либо датчиков тока с системами передачи данных, либо реклоузеров с блоками управления [12-14]. С учетом того, что протяженность ВЛ 10 кВ может достигать 15-20 км, а количество отпаек – 5-10, для диагностики одной линии может потребоваться установка 10-20 комплектов оборудования. Например, в филиале «Кировэнерго» эксплуатируется 1188 линий 10 кВ, а стоимость одного реклоузера напряжением 10 кВ (без учета монтажа и наладки) составляет около 500 000 рублей. Таким образом, внедрение такой системы мониторинга потребует значительных капитальных вложений.

Отсутствие технических средств, предназначенных для эффективного поиска места ОЗЗ, существенно увеличивает вероятность возникновения аварийных и электроопасных ситуаций, включая поражение персонала электрическим током, повреждение силового оборудования и развитие аварийных режимов в распределительных сетях. Поиск места ОЗЗ в условиях отсутствия качественных приборов представляет собой трудоёмкий и времязатратный процесс, особенно в сетях с разветвлённой топологией. Применение специализированных приборов нового типа позволяет значительно повысить оперативность и точность обслуживания, минимизируя временные затраты на локализацию и устранение замыканий. В этой связи возникает научно-практическая задача разработки устройства нового типа, обеспечивающего как определение места ОЗЗ, так и индикацию опасного приближения обслуживающего персонала к потенциально опасной зоне с целью повышения безопасности труда персонала.

Выводы. На основании приведенной статистики технических характеристик ВЛ 6-10 кВ показано, что их основными особенностями являются разветвленная структура, значительная протяженность, а также большое количество отпаек. Большинство линий являются одноцепными и имеют одностороннее питание. Обосновано и впервые дано определение понятию разветвлённой распределительной электрической сети на основании введенной величины степени разветвленности α, которая для разветвлённых распределительных электрических сетей превышает 30 и более %.

Полученные данные позволяют разработать прибор для поиска места ОЗЗ, что обусловлено именно необходимостью повышения уровня профессиональной безопасности труда в условиях эксплуатации распределительных сетей 6-10 кВ, и направлено на снижение производственного травматизма, путем предупреждения обслуживающего персонала о приближении к опасной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Дюкин, И.Р. Особенности сельских электрических сетей / И.Р. Дюкин, А.В. Братухин, А.И. Сидоров // Вестник Вятского ГАТУ. – 2023. – № 4(18). – С. 15-23.

2. Анализ повреждений в разветвленных распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ / А.И. Сидоров, И.Р. Дюкин, А. В. Братухин [и др.] // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, Челябинск, 02-03 октября 2024 года. – Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2024. – С. 92-98.

3. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Определение современных показателей надежности воздушных линий электропередачи 0,4-110 кВ//Агроинженерия. 2023. – Т. 25, № 1. – С. 77-85. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-77-85.

4. Панков, О.В. Внедрение системы мониторинга цифрового РЭС на объектах ОАО «Сетевая компания» [Текст] / О.В. Панков, Е.А. Карташёва // Автоматизация и IT в энергетике. – 2018. – № 6 (107). – С. 31-34.

5. Федотов, А.И. Определение мест обрыва и однофазных замыкания на землю в распределительных электрических сетях по параметрам режима на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций [Текст] / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Н.В. Роженцова, Р.Э. Абдуллазянов // Промышленная энергетика. – 2016. – № 4. – С. 34-40.

6. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей [Текст] / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Ата: Кайнар, 1984. – 128 с.

7. Черкасова, Н.И. Анализ состояния сельских электрических сетей 10 кВ в свете мониторинга отказов [Текст] / Н.И. Черкасова // Ползуновский вестник. – 2012. – № 4. – С. 49-54.

8. Афонин, В.В. Принципы построения сельских электрических сетей 10 кВ [Текст] / В.В. Афонин, М.Д. Салистра, В.В. Тисленко, В.И. Шевляков // Электрические станции. – 1986. – № 10. – С. 67-69.

9. Лещинская, Т.Б. Многокритериальная оценка технико-экономического состояния распределительных электрических сетей [Текст] / Т.Б. Лещинская, В.В. Князев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2010. – №2. – С. 14-19.

10. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» [Текст]. – М.: ПАО «Россети», 2017. – 195 с.

11. Воротницкий, В. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6(10) кВ [Текст] / В. Воротницкий, С. Бузин // Новости электротехники. – 2005. – № 3(33).

12. Рыбаков, Л.М. Методы и средства обеспечения работоспособности электрических распределительных сетей 10 кВ [Текст] / Л.М. Рыбаков. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 241 с.

13. Белов, С.И. Многокритериальная оценка стратегии повышения средств электробезопасности сельских электрических сетей 0,38...10 кВ [Текст] / С.И. Белов, Н.Р. Горбунова, Т.Б. Лещинская // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2012. – № 1. – С. 12-15.

14. Боков, Г. С. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? [Текст] / Г.С. Боков // Новости электротехники. – 2002. – № 2(14).

15. Гулидов, С.С. Технико-экономическая характеристика сельских электрических сетей [Текст] / С.С. Гулидов. – М.: Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, 2009. – С. 100-101.

16. Лещинская, Т.Б. Концепция развития систем электроснабжения сельских районов [Текст] / Т.Б. Лещинская, В.И. Шевляков // Электрика, 2004. – № 6. – С. 13-17.

17. ГОСТ 18322–2016 Система технического обслужи-

вания и ремонта техники Термины и определения. Введ. 09.01.2017. М.: Стандартинформ. 2017. – 14 с.

18. IV Всероссийская конференция «Развитие и повышение надежности эксплуатации распределительных электрических сетей» // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 4 (49). – С. 8-17.

19. Бурдуков Н.И., Галеев М.Т., Волтов И.П. Прогнозирование вероятности аварийных отключений на объектах электросетевого комплекса // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 2 (41). – С. 28-31.

20. Терешко О.А. Планирование капитального ремонта распределительных сетей 0,38–20 кВ по техническому состоянию // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 5 (44). – С. 61-63.

21. Разработка метода планирования ремонтной программы электрических сетей по уровню потерь электрической энергии / М.М. Султанов, В.Н. Курьянов, В.Г. Кульков, Д.Ш. Норов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – № 2 (130). – С. 67-71.

22. Генис Я.Г., Ушаков И.А. Оптимальное планирование ремонтных работ по критерию равномерности загрузки // Надежность. – 2013. – № 1 (44). – С. 20-25.

23. Володарский В.А. Оптимизация периодичности ремонтов устройств в условиях вероятностно- неопределенной информации // Методы менеджмента качества. 2020. № 8. – С. 58-61.

24. Попов Г.В., Игнатьев Е.Б. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 4. – С. 25-32.

25. Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Кокин С.Е. Система управления техническими активами предприятий электросетевого комплекса // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 36-40.

26. Воденников Д. Техническое состояние электрооборудования: способы оценки // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № S4 (15). – С. 8-11.

27. Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: в 2 кн. Кн. 1, вып. 70. Ташкент, 23–27 сентября 2019 года. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2019. – С. 316-326.

28. Палагушкин Б.В., Манусов В.З., Иванов Г.В. Анализ технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе двух экспертных подходов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2021. – № 1. – С. 42-46.

29. Хальясмаа А.И. Разработка адаптивной системы управления жизненным циклом электрооборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12, № 2 (46). – С. 13-23.

Статья поступила в редакцию 14.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.101.1
EDN: DFFPSO

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ЭРГОНОМИКЕ РАБОЧЕГО МЕСТА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9205-9338
AuthorID: 846394
ScopusID: 56871202000

КОНДРАТЬЕВА Ольга Евгеньевна, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Инженерной экологии и охраны труда»
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, e-mail: kondratyevaoye@mpei.ru)

SPIN: 6336-1458
AuthorID: 1273905
ScopusID: 59055546200

ВАСИЛЬЕВА Наталья Владимировна, аспирант,
старший преподаватель кафедры «Инженерной экологии и охраны труда»
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, e-mail: vasilevanv@mpei.ru)

SPIN: 7180-7573
AuthorID: 1219740

МАТЫЦИН Андрей Викторович, магистр,
ассистент кафедры «Инженерной экологии и охраны труда»
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, e-mail: matytsinav@mpei.ru)

Аннотация. В данной статье рассматриваются требования действующих стандартов в сфере эргономики рабочего места оператора в России. Термин «оператор» включает в себя работников, осуществляющих функции управления оборудованием, контроля за производственным процессом, управления транспортными средствами, работы с документацией. Таким образом, на основе общей номенклатуры эргономических стандартов был проведён сравнительный анализ требований, отражённых в действующих стандартах, для таких пунктов как: органы управления, средства отображения информации, проектировочные параметры рабочего места. Регламентируемые нормы для каждого из рассмотренных пунктов разделены на основе нормативно-технической документации на различные типы, требования для которых в дальнейшем анализировались. Исходя из сравнительного анализа, в статье были выделены общие проблемы нормативно-технических актов в сфере эргономики, такие как: конфликты действующих стандартов, неактуальность ввиду несоответствия уровню технического прогресса, повтор одинаковых требований в различных документах. С учётом обнаруженных недостатков показана целесообразность актуализации стандартов в сфере эргономики, а также их объединение в общий нормативно-технический акт, устанавливающий регламентацию норм для рабочего места оператора, с целью облегчения работы проектировщиков рабочих мест с данной документацией.

Ключевые слова: эргономика, условия труда, стандарт, охрана труда, безопасность, рабочее место, оператор, требования, органы управления, средства отображения информации.

ANALYSIS OF THE MAIN REQUIREMENTS OF REGULATORY AND TECHNICAL DOCUMENTS FOR WORKPLACE ERGONOMICS

© The Author(s) 2025

KONDRATYEVA Olga Evgenevna, doctor of technical sciences, associate professor,
head of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection
National Research University "MPEI"
(111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, buil. 1, e-mail: kondratyevaoye@mpei.ru)

VASILYEVA Natalya Vladimirovna, postgraduate student,
senior lecturer of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection
National Research University "MPEI"
(111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, buil. 1, e-mail: vasilevanv@mpei.ru)

MATYTSIN Andrey Viktorovich, magister,
assistant of the Department of Environmental Engineering and Labor Protection
National Research University "MPEI"
(111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, buil. 1, e-mail: matytsinav@mail.ru)

Abstract. This article considers the requirements of current standards in the field of ergonomics of the operator's workplace in Russia. The term ‘operator’ includes workers who perform the functions of operating equipment,

controlling the production process, controlling vehicles, working with documentation. Thus, on the basis of the general nomenclature of ergonomic standards a comparative analysis of the requirements reflected in the current standards for such items as: controls, means of information display, design parameters of the workplace was carried out. The regulated norms for each of the considered items are divided on the basis of normative-technical documentation into different types, the requirements for which were further analysed. Based on the comparative analysis, the common problems of normative-technical acts in the sphere of ergonomics were identified, such as: conflicts of existing standards, irrelevance due to inconsistency with the level of technical progress, repetition of the same requirements in different documents. Taking into account the revealed shortcomings it is reasonable to actualise the standards in the sphere of ergonomics, as well as their unification into a common normative-technical act, establishing the regulation of norms for the operator's workplace, in order to facilitate the work of designers of workplaces with this documentation.

Keywords: ergonomics, working conditions, standard, labour protection, safety, workplace, operator, requirements, controls, information display means.

Для цитирования: *Кондратьева О.Е. Анализ основных требований нормативно-технических документов к эргономике рабочего места / О.Е. Кондратьева, Н.В. Васильева, А.В. Матыцин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 275-281. – EDN: DFFPSO.*

Введение. Неудобные рабочие позы, тяжелый физический труд, повторяющиеся движения, организационные факторы могут серьезно подорвать здоровье работников. Соблюдение эргономических требований к производственной среде необходимо для безопасности, здоровья работников и повышения производительности. Эти требования, основанные на научных исследованиях и практическом опыте, содержатся в нормативных документах и стандартах. Необходим комплексный подход, включающий оценку рисков, анализ рабочих процессов, оценку состояния операторов и разработку эффективных эргономических мероприятий для снижения риска травматизма и развития профессиональных заболеваний. Поэтому в работе проведен анализ нормативной базы в области оценки эргономических факторов и показана возможность интегрирования их в систему управления охраной труда (СУОТ) на предприятии.

По данным исследований обозначено, что традиционные подходы по минимизации травматизма и заболеваний исчерпали себя и возникает необходимость разработки принципиально новых решений [1].

Общая номенклатура эргономических требований представлена в ГОСТ 20.39.108-85, а основные принципы и методы эргономической оценки рабочих мест содержатся в методических рекомендациях МР 3212-85 [2,3]. Недостатками МР 3212-85 является отсутствие унифицированной методики выявления влияния условий труда на конкретном рабочем месте. В рекомендациях предлагается проводить учет этих данных при помощи анкетирования, опросов, интервьюирования персонала, но такая оценка носит субъективный характер.

В классификации опасностей по видам деятельности представленной в приказе Министерства труда и социальной защиты РФ №36 [4], выделены следующие виды опасностей: связанные с профессиональной деятельностью работника; связанные с организацией производственной деятельности у работодателя; не связанные с профессиональной деятельностью работника и организацией производственной деятельности у работодателя; обусловленные профессиональными качествами работника, выполняющего данную работу.

В Приказе Минтруда России от 29.10.2021 № 774н обозначено, что базовая конструкция рабочего места должна позволять наращивать дополнительные устройства и формировать рабочее место сотрудника в зависимости от его функций и потребностей [5].

Анализ действующих эргономических стандартов показал, что многие из них были утверждены в период с 1976 по 2000 года. Их основные отличия: стандарты эргономики времён СССР (ГОСТ 22269-76, ГОСТ 12.2.032-78) [6, 7]. Действующий ГОСТ Р 50923-96 не регламентирует требования к месту для работ стоя, что вызывает трудности в его применении [8]. Кроме того, он введён для рабочих мест на основе уже вышедшего из эксплуатации оборудования (дисплеи на электронно-лучевых трубках), что делает его неактуальным.

Процесс кардинального реформирования законодательства в сфере охраны труда начался еще в 2021 году [9]. Приведенные в статье изменения показывают, что перечень мероприятий по охране труда должен основываться на выявленных опасностях, характерных для конкретного рабочего места, с учетом специфики деятельности работника, эргономики рабочего места, условий труда и его особенностей.

Методология. Целью исследования является выявление проблем и направлений актуализации нормативно-технической базы в сфере эргономики рабочих мест для обеспечения безопасности и уменьшения рисков здоровью работников при выполнении производственных задач.

В России нормативно-правовая база, регламентирующая безопасность труда и охрану здоровья работников, разработана так, чтобы обеспечивать удовлетворенность сотрудников и повышать эффек-

тивность их работы, одновременно снижая уровень травматизма, а также предотвращения возможного неблагоприятного влияния использования систем на здоровье и безопасность человека применяется человеко-ориентированное проектирование, которое направлено на создание пригодных в использовании и полезных систем с учетом особенностей пользователей, их потребностей на основе эргономических принципов.

В исследовании проведен обзор актуализированного российского законодательства в области эргономики рабочего пространства. Общая номенклатура эргономических требований согласно ГОСТ 20.39.108-85, может быть представлена следующим образом [2]:

1. Организация системы «человек-машина». Устанавливаются требования к операторскому составу и квалификации сотрудника, временные рамки и режимы работы оператора с автоматизированными средствами труда, а также разделяют выполняемые функции.

2. Описание деятельности оператора. Описываются выполняемые задачи, инструкции по их выполнению и последовательность действий, а также требования к эксплуатационной документации.

3. Требования к органам управления (ОУ), используемым оператором. Устанавливаются необходимые эргономические характеристики органов управления.

4. Требования к средствам отображения информации (СОИ). Устанавливаются нормы для средств передачи визуальной, тактильной и акустической информации.

5. Описание проектировочных параметров рабочего пространства. Устанавливаются требования с учётом рабочих поз, форма и размеры кресла и другой используемой в процессе трудовой деятельности мебели.

6. Организация мероприятий по поддержанию работоспособности оператора. Описываются необходимые форматы обучения и тренировки операторского состава, подлежащие проведению, а также режимы труда и отдыха, требования психологического отбора, комплектности экипировки, специального снаряжения и средств индивидуальной защиты работника.

7. Требования к параметрам производственной среды. Регламентируются требования к физическим, химическим, биологическим и социально-бытовым факторам.

Следует провести анализ требований к ОУ, СОИ и проектировочным параметрам рабочего пространства.

В ходе анализа целесообразно разделить требования к ОУ на такие группы, как [10]:

1. Общие требования для всех ОУ.
2. Кнопки и клавиши.
4. Рычажные переключатели (тумблеры).
5. Поворотные переключатели и регуляторы.
6. Маховики и штурвалы.
7. Рычаги управления.
8. Пульты управления.

Согласно ГОСТ Р 50948-2001 [11], требования к средствам отображения информации можно разделить на следующие группы:

1. Общие эргономические требования, включающие в себя нормы цветовых параметров дисплеев и качества восприятия информации;

2. Требования безопасности к визуальным параметрам отображения информации (яркость, амплитуда сме-щения, искажение);

3. Требования безопасности к параметрам создаваемых полей таким, как напряжённость электромагнитного поля, плотность магнитного потока, электростатический потенциал и другим;

4. Требования к конструкции и расположению.

В данной работе рассмотрению подлежат общие эргономические требования, требования безопасности к визуальным параметрам и к конструкции и расположению.

Проектировочные параметры рабочего пространства устанавливают размерные характеристики к используемой в процессе трудовой деятельности мебели и рабочим позам [2].

Результаты. В таблице 1 проведён сравнительный анализ общих для все типов ОУ требований эргономики. При сравнении эргономических требований к органам управления можно выделить проблему, заключающуюся в недостаточной конкретизации действующих стандартов: ГОСТ 22269-76 не регламентирует параметры зон досягаемости моторного поля и не ссылается на ГОСТ 12.2.032-78, в котором они прописаны [6, 7]. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 же в свою очередь вообще не устанавливает размерных характеристик зон досягаемости [12]. Также можно выделить повторение одинаковых требований в стандартах, к примеру: ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ и ГОСТ 21753-76 параллельно регламентируют рекомендуемую форму и расположение ОУ [13,14]. Недостатки не выявлены в стандартах ГОСТ 12.2.032-78 [7], ГОСТ Р ИСО 9355-3-2010 [15], ГОСТ Р ИСО 1503-2014 [16].

Приведённый в таблице 2 анализ стандартов, устанавливающих требования к СОИ, позволил выявить кон-фликты действующего ГОСТ 12.2.032-78 [7], устанавливающего угол наблюдения в диапазоне ±60° в вертикальной плоскости относительно нормальной линии взгляда, сразу с несколькими документами: ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 [18], ГОСТ Р 50923-96 и ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 [8,12], – которые в свою очередь требуют рас-полагать СОИ строго ниже уровня нормальной линии взгляда на 60°. Такой конфликт стандартов может спровоцировать проектировщика рабочего места следовать уже неактуальным требованиям к расположению СОИ, что приведёт к риску возникновения профзаболевания или стресса работника в процессе труда, влекущие за собой ухудшение производительности.

Также выявлен конфликт требований по высоте, ширине контура знака и наличию мелькания изображения в двух нормативно-технических актах: ГОСТ Р 50948-2001 (высота символа не менее 20'; ширина контура знака 0,25-0,5 мм; мелькание исключено) и ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 (высота символа не менее 16'; ширина штриха должна быть в пределах 1/6-1/12 высоты знака; мелькание не должно быть замечено 90%-ми пользователей) [11,18].

Из анализа видно, что такие стандарты, как ГОСТ 22269-76, ГОСТ 12.2.032-78 имеют недостаточную актуальность [6,7], так как изданы в период СССР и в меньшей степени соответствуют уровню технологического прогресса и больше носят общий характер, когда современные нормативно-технические документы конкретизированы под различные виды используемого оборудования. Также видно, что ГОСТ Р 50923-96 [8], ГОСТ Р 50948-2001, ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 регламентируют часть требований для устаревших дисплеев на элек-тронно-лучевых трубках [11,18]. Следует отметить расположение различных групп требований к СОИ в разных документах, что, в свою очередь, затрудняет использование нормативно-технической базы в области эргономики специалистами для проектировки элементов рабочих мест.

Из анализа, представленного в таблице 3, видно, что такие действующие нормативно-правовые акты, как ГОСТ 12.2.033-78 и ГОСТ 12.2.032-78 для работ сидя и стоя представляют неактуальные характеристики эксплуатируемой оператором мебели ввиду изменения антропометрических данных населения [19,7], а, соответственно, необходима актуализация с учётом современной антропометрии человека [20]. Следует выделить конфликт требований нормативно-технических актов по высоте рабочей поверхности: ГОСТ 12.2.032-78 устанавливает требование по высоте в диапазоне 630-1020 мм [7], а ГОСТ Р 50923-96 – в диапазоне 680-800 мм [8]. Данный конфликт требований обусловлен недостаточной ориентированностью более современного стандарта на антропометрию работников разных полов и работы стоя, однако он предъявляет подробные требования к другим размерным характеристикам рабочего стола и кресла.

При сравнении эргономических требований к размерам используемой мебели отмечено, что такие более актуальные стандарты, как: ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 [12], ГОСТ Р ИСО 11064-4-2015 [21], – регламентируют использование метода процентилей для более точного охвата антропометрических характеристик сотрудников на отдельном предприятии при проектировании необходимого оборудования и мебели.

Таблица 1 – Анализ общих требований эргономики ко всем типам ОУ

Название стандарта	Общие эргономические требования	Недостатки
ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности [13]	1) Безопасные и удобные для работы форма, размеры и поверхность 2) Расположение, не затрудняющее работу с другими элементами системы и непровоцирующее самопроизвольное включение и выключение производственного оборудования 3) Размещение с учетом необходимых усилий, частоты использования и значимости 4) Использование должно быть унифицировано для ОУ, относящихся к одной функциональной группе 5) Расположение ОУ должно соответствовать порядку их использования 6) Аварийные ОУ – красного цвета и уникальной формы, имеющие надписи о назначении	Недостаточная конкретизация общих требований. Повторение аналогичных требований к форме и расположению ОУ с ГОСТ 21753-76 [14]
ГОСТ 21753-76 Система «человек-машина». Рычаги управления. Общие эргономические требования [14]	1) Форма и размеры для удобства захвата и удержания (шаровидная, цилиндрическая с гладкой или рифленой поверхностью) 2) Расположение в пределах досягаемости моторного поля	Недостаточная конкретизация общих требований. Повторение аналогичных требований к форме и расположению ОУ с ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ [13]
ГОСТ 22269-76 Система «Человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования [6]	ОУ должны быть расположены: 1) В зоне досягаемости моторного поля 2) В зоне легкой досягаемости — наиболее важные и часто используемые 3) Сгруппированы для выполнения последовательных действий в направлении слева направо и сверху вниз 4) Единообразно на всех панелях рабочего места —функционально идентичные ОУ 5) Обеспечивая равномерную нагрузку обеих рук и ног оператора 6) Функциональными группами так, чтобы индикаторы, связанные с ОУ, не закрывались ОУ или рукой оператора 7) Отдельно — применяемые только для технического обслуживания	Недостаточная конкретизация общих требований. Отсутствие отсылки на размеры зон досягаемости в ГОСТ 12.2.032-78 [7]
ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 [12]	Зоны досягаемости ОУ в диапазоне от 90-го процентиля мужчин до 5-го процентиля женщин	Конфликт требований к размерам зон досягаемости с ГОСТ 12.2.032-78 [7]
ГОСТ Р ИСО 9241-400-2013 Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 400. Принципы и требования к устройствам физического ввода [17]	1) Введение основных терминов, отражающих характеристики органов управления и взаимодействия человека с системой 2) Требования к проектированию с учетом эксплуатационных качеств, взаимодействия с человеком	Отсутствие конкретных показателей качества взаимодействия человека с системой

Таблица 2 – Анализ требований эргономики к средствам отображения информации

Стандарт	Общие требования	Требования к визуальным параметрам	Требования к конструкции и расположению	Ограничения
ГОСТ 22269-76 [6]	–	–	1) СОИ для выполнения задачи расположены по очереди использования слева направо или сверху вниз 2) Лицевые поверхности индикаторов следует располагать перпендикулярно нормальной линии взора. Отклонение от нормальной линии – не более 25° для стрелочных индикаторов и 30° для индикаторов с плоским изображением	Недостаточная конкретизация общих требований и неактуальность терминологии
ГОСТ 12.2.032-78 [7]	–	–	1) Очень часто – в вертикальной плоскости ±15° от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости ±15° от сагиттальной плоскости 2) Часто используемые в вертикальной плоскости ± 30° от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости ±30° от сагиттальной плоскости 3) Редко используемые в вертикальной плоскости ±60° от нормальной линии взгляда и в горизонтальной плоскости ±60° от сагиттальной плоскости	Неактуальность терминологии. Конфликт требований по углу наблюдения с ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 [18], ГОСТ Р 50923-96 и ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 [8,12]
ГОСТ Р 50923-96 [8]	–	–	1) Расположение с различимостью любой части изображения без движения головы 2) Угол наблюдения строго ниже горизонтальной линии взгляда не более 60°	Для рабочих мест с использованием дисплеев на ЭЛТ. Конфликт требований по углу наблюдения с ГОСТ 12.2.032-78 [7]
ГОСТ Р 50948-2001 [11]	1) Должна быть возможность восстановления назначенного по умолчанию набора цветов 2) Угловой размер символа по высоте не менее 20' 3) Угловой размер изображения не менее 30' (предпочтительно - 40') 4) Требования к применению синих и красных цветов на различном фоне 5) Не более 11 различных цветов для точной идентификации. Не более 6 различных цветов для быстрого поиска	1) Требования к яркости для дисплеев на ЭЛТ и плоских дискретных экранов 2) Неравномерность яркости рабочего поля не более 20% 3) Требования к яркостному контрасту 4) Ширина контура знака 0,25-0,5 мм 5) Для дисплеев на ЭЛТ степень несведения цветов должна быть не более 3,4' 6) Исключено мелькание для дисплеев на ЭЛТ и на плоских дискретных экранах. Для ЭЛТ частота обновления изображения не менее 75 Гц и не менее 60 Гц для плоских дискретных экранов 7) Изменение размеров однотипных знаков по рабочему полю ±5% высоты знака 8) Изменение положения элементов не превышает 0,0002 мм на один миллиметр расстояния наблюдения	1) Обеспечена возможность поворота корпуса дисплея вокруг вертикальной оси на ±30° и вокруг горизонтальной оси от -30° до -15° с фиксацией 2) Корпус дисплея должен быть окрашен в мягкие тона без бликов 3) Не рекомендуется располагать органы управления на лицевой стороне дисплея 4) Наличие регулировки контраста и яркости	Часть требований относятся к дисплеям на ЭЛТ. Конфликт требований по высоте символа и наличию мелькания с ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 [18]
ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 [18]	1) При угле от нормали к плоскости экрана не менее 40° изображение на экране дисплея четкое и разборчивое 2) Угловой размер знака не менее 16' по высоте	1) Ширина штриха должна быть в пределах 1/6-1/12 высоты знака 2) Отношение ширины знака к его высоте от 0,7:1 до 0,9:1 3) Требования к модуляции растра и коэффициенту заполнения для ЭЛТ и матричных дисплеев 4) Требования к матрице знака 5) Изменение размеров однотипных знаков по рабочему полю ±5% высоты знака 6) Требования к интервалам между различными знаками 7) Требования к яркости и яркостному контрасту 8) 90% пользователей не должны замечать мелькания 10) Изменение положения элементов не превышает 0,0002 мм на один миллиметр расстояния наблюдения в диапазоне частот от 0,5 до 30 Гц	1) Расстояние наблюдения не менее 400 мм. Возможно сокращение до 300 мм при сохранении качества изображения 2) Угол наблюдения строго ниже горизонтальной линии взгляда не более 60° 3) Положение экрана легко регулируется для оптимального угла обзора	Часть требований относятся к дисплеям на ЭЛТ. Конфликт требований по углу наблюдения с ГОСТ 12.2.032-78; высоте символа и наличию мелькания с ГОСТ Р 50948-2001 [7,11]
ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 [12]	–	–	1) В вертикальной плоскости линия зрения заключена между горизонталью и 60° ниже 2) В горизонтальной плоскости линия зрения заключается в диапазоне ±60° от прямой линии 3) Оптимальное расположение видеодисплея в диапазоне ±15° в вертикальном и горизонтальном направлении	Конфликт требований по углу наблюдения с ГОСТ 12.2.032-78 [7]

Таблица 3 – Анализ требований эргономики к проектировочным параметрам рабочего места

Стандарт	Требования	Ограничения
Рабочая поза работника		
ГОСТ 12.2.033-78 [19]	Организация рабочего места и конструкция оборудования обеспечивают прямое и свободное положение корпуса или наклон вперед не более 15°	Неактуальность стандарта ввиду изменения антропометрических данных
ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 [12]	Расположение частей тела в позе «сидя», предусмотренной конструкцией: 1) бедра находятся приблизительно в горизонтальной позиции, а ноги от колена до ступни — в вертикальной позиции; высота сиденья должна равняться длине голеней до подколенной области или немного меньше 2) плечо — вертикально, предплечье — горизонтально 3) работа не требует сгибаний или разгибаний запястий 4) позвоночник — вертикально 5) угол в 90° между голенью и ступней 6) скручивание верхней части туловища отсутствует 7) линия зрения в пределах 0-60° ниже горизонтали	Содержит только общие рекомендации для проектируемых элементов рабочего места
ГОСТ Р ИСО 11064-4-2015 [21]	Приведена классификация из 4 рабочих поз пользователя сидя в зависимости от выполняемой задачи	Содержит только общие понятия для рабочих поз
Размерные характеристики используемой мебели		
ГОСТ 12.2.033-78 [19]	Учитывать при проектировании: 1) Если работают только женщины: антропометрические показатели женщин 2) Если работают только мужчины: антропометрические показатели мужчин 3) Если работают мужчины и женщины - общие средние показатели 4) Конструкцией оборудования и организацией рабочего места обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности и подставки для ног (приведены значения высоты в зависимости от роста) 5) Для работ стоя высота рабочей поверхности в диапазоне 870-1060 мм 6) Пространство для стоп не менее 150 мм по глубине, 150 мм по высоте и 530 мм по ширине	Неактуальность стандарта ввиду изменения антропометрических данных. Регламентируются требования к устаревшей подставке для ног
ГОСТ 12.2.032-78 [7]	Учитывать при проектировании: 1) Если работают только женщины: антропометрические показатели женщин 2) Если работают только мужчины: антропометрические показатели мужчин 3) Если работают мужчины и женщины - общие средние показатели 4) Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног 5) Для работ сидя высота рабочей поверхности в диапазоне 630-1020 мм 6) Высота сиденья в диапазоне 400-430 мм 7) Подставка для ног регулируемая. Ширина не менее 300 мм, длина - не менее 400 мм. Поверхность подставки рифленой. По переднему краю предусмотрен бортик высотой 10 мм	Неактуальность стандарта ввиду изменения антропометрических данных Регламентируются требования к устаревшей подставке для ног Конфликт требований к высоте рабочей поверхности с ГОСТ Р 50923-96 [8]
ГОСТ Р 50923-96 [8]	Рабочий стол: 1) Конструкция обеспечивает возможность размещения комплекта оборудования и документов с учетом характера работы 2) Высота рабочей поверхности: - нерегулируемая — 725 мм - регулируемая в пределах 680-800 мм. Механизмы для регулирования легко досягаемы, легкие в управлении и надежно фиксируются 3) Размеры рабочей поверхности стола: - глубина — не менее 600 (предпочт. 800) мм, - ширина — не менее 1200 (предпочт. 1600) мм 4) Рабочий стол с пространством для ног: - высота не менее 600 мм, - ширина — не менее 500 мм, - глубина на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм 5) Рабочая поверхность стола без острых углов и краев. Покрытие рабочей поверхности из диффузно отражающего материала с коэффициентом отражения 0,45-0,50 Кресло оператора: 1) Глубина и ширина поверхности сиденья не менее 400 мм с возможностью изменения угла наклона поверхности сиденья от 15° вперед до 5° назад. Высота поверхности сиденья должна регулироваться в пределах 400-550 мм 2) Опорная поверхность спинки стула: - высота (300±20) мм, - ширина не менее 380 мм - радиус кривизны в горизонтальной плоскости 400 мм. - угол наклона спинки регулируется в пределах 0°±30° - расстояние спинки от переднего края сиденья регулируется в пределах 260-400 мм 3) Длина подлокотника: - не менее 250 мм, - ширина — 50-70 мм, с возможностью регулирования по высоте в пределах (230+30) мм и регулирования внутреннего расстояния в пределах 350-500 мм. Содержит размерные характеристики подставки для ног и пюпитру	Конфликт требований к высоте рабочей поверхности с ГОСТ 12.2.032-78 [7]. Отсутствие ориентированности на работы стоя и на антропометрию работников разных полов Регламентируются требования к устаревшей подставке для ног
ГОСТ Р ИСО 11064-4-2015 [21]	Приведены рекомендации к проектированию элементов рабочей станции на основе метода процентилей	Отсутствие описания размеров рабочей станции оператора

Обсуждение. Требования к организации системы «человек-машина-среда», деятельности оператора и организации мероприятий по поддержанию работоспособности работника в настоящее время представлены в профессиональных стандартах, едином квалификационном справочнике должностей и правилах по охране труда. Перечень требований и допустимых величин для гигиенических параметров производственной среды регламентируются нормами СанПиН 1.2.3685-21 [22], а их оценка проводится в рамках СОУТ и ОПР. Поэтому их рассмотрение не целесообразно.

В данной работе рассмотрению не подлежат требования к параметрам электрических, магнитных и электромагнитных полей в помещениях, так как они регламентируются СанПиН 1.2.3685-21 [22], нормы которого с учётом законодательства, в свою очередь, являются обязательными к соблюдению и контролируются.

Анализ нормативно-технических актов в области эргономики рабочего места оператора выявил следующие проблемы и направления актуализации требований эргономики:

– конфликты требований действующих стандартов;

– отсутствие внедрения результатов современных исследований;

– регламентируемые требования для одних и тех же элементов содержатся в различных документах, что усложняет работу с ними;

– одинаковые требования для аналогичных элементов повторяются в нескольких стандартах;

– действуют для рабочих мест, спроектированных на основе уже вышедшего из эксплуатации оборудования (к примеру, для дисплеев на электронно-лучевых трубках).

Выводы. На основе выявленных проблем нормативной базы в области эргономики в РФ обоснована необходимость работы по актуализации и объединению требований к рабочему месту оператора в один стандарт. Это позволит облегчить работу с документацией в сфере эргономики и уменьшить риски здоровью работника в процессе выполнения производственных задач.

Исходя из анализа требований к рабочему месту, содержащихся в стандартах и в исследованиях, структура стандарта помимо общих положений, должна содержать в себе требования к:

– рабочему месту и позе;

– органам управления;

– средствам отображения информации;

– характеристикам, влияющим на психофизиологическое состояние оператора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Loktionov O.A. Comparative analysis of injuries models and methods assessment in power industry with cause-and-effect relationship / Loktionov O.A. // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Elec-tronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021: Moscow, 11–13th March 2021. – Moscow, 2021. – P. 1-5. – DOI 10.1109/REEPE51337.2021.9388029. – EDN YUBQTH.

2. ГОСТ 20.39.108-85 Комплексная система общих технических требований. Требования по эргономике, обитаемости и технической эстетике. Номенклатура и порядок выбора. – М.: Издательство стандартов, 1986.

3. МР 3212-85 Основные принципы и методы эргономической оценки рабочих мест для выполнения работ сидя и стоя. – М: "Ротапринт НИИ ГТиПЗ АМН СССР"

4. Приказ Минтруда России от 31.01.2022 № 36 «Об утверждении Рекомендаций по классификации, обнаружению, распознаванию и описанию опасностей»)

5. Приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 774н «Об утверждении общих требований к организации безопасного рабочего места»

6. ГОСТ 22269-76 Система «Человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования. – М.: Издательство стандартов, 1976.

7. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.: Издательство стандартов, 1986.

8. ГОСТ Р 50923-96 Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – М.: Стандартинформ, 2008.

9. Перспективы повышения безопасности труда в условиях реформирования трудового законодательства в России / О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов, П.Н. Баева [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – № 1(70). – С. 94-98. – EDN NXDWBD.

10. ГОСТ EN 894-3-2012 Безопасность машин. Эргономические требования к оформлению индикаторов и органов управления. Часть 3. Органы управления. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.

11. ГОСТ Р 50948-2001. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008. – 4 с.

12. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (ВДТ). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке операто-ра. – М.: Стандартинформ, 2010.

13. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ Оборудование производственное. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2007.

14. ГОСТ 21753-76 Система человек-машина. Рычаги управления. Общие эргономические требования. – М.: Издательство стандартов, 1987.

15. ГОСТ Р ИСО 9355-3-2010 Эргономические требования к проектированию дисплеев и механизмов управления. Часть 3. Механизмы управления. М.: Стандартинформ, 2019.

16. ГОСТ Р ИСО 1503-2014 Эргономика. Требования к пространственной ориентации и направлениям движения органов управления. М.: Стандартинформ, 2015.

17. ГОСТ Р ИСО 9241-400-2013 Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 400. Принципы и требования к устройствам физического ввода. М.: Стандартинформ, 2019.

18. ГОСТ Р ИСО 9241-3-2003 Эргономические требования при выполнении офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (ВДТ). Часть 3. Требования к визуальному отображению информации. – М.: Издательство стандартов, 2003.

19. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

20. Лебедева Л.С. Проблемы пространственно-временной изменчивости дефинитивной длины тела мужчин на протяжении XIX-XX вв: специальность 5.6.4 «Этнология, антропология и этнография (исторические науки)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата исторических наук / Лебедева Лидия Сергеевна, 2024. – 162 с.

21. ГОСТ Р ИСО 11064-4-2015 Эргономическое проектирование центров управления. Часть 4. Расположение и размеры рабочих мест. – М.: Стандартинформ, 2016.

22. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Центрмаг, 2021.

Статья поступила в редакцию 25.04.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 331.4, 624.9, 004.942
EDN: SULFDF

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА РАБОТНИКОВ С ВЫСОКИМ РИСКОМ ПАДЕНИЯ С ВЫСОТЫ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ДЕЙСТВИЙ

©Автор(ы) 2025

SPIN: 2070-8620
AuthorID: 958394
ORCID: 0000-0002-0557-6725
ScopusID: 57983646500

СУББОТИНА Надежда Андреевна, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность»
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: subbota_91@mail.ru)

SPIN: 4586-8078
AuthorID: 609617
ORCID: 0000-0002-6878-0512
ScopusID: 56149908500

НИКУЛИН Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
(190005, Россия, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, e-mail: Nikulin.A.N@lan.spbgasu.ru)

Аннотация. Статистика показывает, что в строительной отрасли неизменно выявляется самое большое количество смертельных несчастных случаев, причиной которым являются недостатки в организации работ и множество нарушений в области обучения. Согласно многочисленным исследованиям, подтвержденным практическими данными, есть взаимосвязь между количеством опасных действий работников и количеством тяжелых несчастных случаев на производстве. Следовательно, для того чтобы снизить травматизм и повысить безопасность труда при выполнении работ на высоте, необходимо работать с корнем проблемы – вести учет опасных действий работников. Авторами предлагается метод оценки профессионального риска работников, выполняющих работы на высоте, основанный на выявлении в ходе текущих проверок наиболее тяжелых по последствиям опасных действий, допускаемых работниками, и ежемесячном перерасчете уровня профессионального риска по опасности «падение с высоты». Для определения градации тяжести последствий различных опасных действий при выполнении работ на высоте собраны мнения экспертов, имеющих опыт профессиональной деятельности в данной области. Для определения вероятности возникновения опасности «падение с высоты» проведен анализ актов о расследовании несчастных случаев, в рамках которого выявлялось количество нарушений, приводящих к падению с высоты. При совершении работниками в течение года критического количества опасных действий, работники отстраняются от выполнения работ с целью направления на внеплановое обучение безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте.

Ключевые слова: профессиональный риск, опасные действия, тяжесть последствий, обучение безопасным методам и приемам выполнения работ, работы на высоте, безопасность, охрана труда, компетентность, профессиональная пригодность.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE PROFESSIONAL RISK OF WORKERS WITH HIGH RISK OF FALLING FROM HEIGHT BASED ON MONITORING HAZARDOUS ACTIONS

© The Author(s) 2025

SUBBOTINA Nadezhda Andreevna, senior lecturer of the department «Technosphere safety»
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: subbota_91@mail.ru)

NIKULIN Andrey Nikolaevich, phd in technical sciences, associate professor, dean of the Faculty of Civil Engineering, head of the Department of Technosphere Safety
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
(190005, Russia, Saint Petersburg, Vtoraya Krasnoarmeiskaya street 4, e-mail: Nikulin.A.N@lan.spbgasu.ru)

Abstract. Statistics show that the construction industry consistently has the highest number of fatal accidents, caused by deficiencies in work organization and numerous violations in the field of training. According to numerous studies, confirmed by practical data, there is a relationship between the number of dangerous actions of workers and the number of serious accidents at work. Therefore, in order to reduce injuries and improve labor safety when working at height, it is necessary to deal with the root of the problem - to keep records of dangerous actions of workers. The authors propose a method for assessing the professional risk of workers performing work at height, based on identifying the most severe hazardous actions committed by workers during routine inspections, and monthly recalculation of the level of professional risk for the hazard of "falling from a height". To determine the gradation of the severity of the consequences of various hazardous actions when performing work at height, the opinions of experts with professional experience in this

field were collected. To determine the probability of the occurrence of the hazard of "falling from a height", an analysis of accident investigation reports was conducted, within the framework of which the number of violations leading to falling from a height was identified. If workers commit a critical number of hazardous actions during the year, they are suspended from work in order to send them to unscheduled training in safe methods and techniques for performing work at height.

Keywords: professional risk, dangerous actions, severity of consequences, training in safe methods and techniques for performing work, work at height, safety, labor protection, competence, professional suitability.

Для цитирования: *Субботина Н.А. Разработка метода оценки профессионального риска работников с высоким риском падения с высоты на основе мониторинга опасных действий / Н.А. Субботина, А.Н. Никулин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 282-289. – EDN: SULFDF.*

Введение. Согласно статистическим данным одной из наиболее травмоопасных сфер экономической деятельности является строительная сфера. Ежегодно на строительных площадках травмируется и погибает наибольшее количество работников, в среднем за последние несколько лет каждый 4-й работник погибает именно в строительной сфере [1, 2]. При этом основным видом происшествия является падение при разности уровней высот, по данным за 2023 год – 22,7% всех несчастных случаев с тяжелыми последствиями [2-4]. Несчастные случаи при падении с высоты представляют собой одну из самых серьезных и опасных категорий травматизма в строительстве. Причины таких происшествий часто кроются в недостаточной оценке рисков, отсутствии надлежащих средств защиты и несоблюдении требований безопасности. Даже небольшая ошибка или невнимательность могут привести к тяжелым последствиям [4]. Наивысшему риску падений с высоты подвергаются работники, чья деятельность связана с выполнением задач в непосредственной близости от перепадов по высоте, это работники, выполняющие: кровельные работы (сталкиваются с опасностями, связанными с наклонными, скользкими поверхностями, нестабильными конструкциями), монтажные или фасадные работы (занимаются установкой конструкций, часто находясь на лесах или подъемниках), монолитные работы (зачастую пренебрегают установкой временных ограждений при установке арматурных стержней и заливке опалубки бетонной смесью, что приводит к падениям с высоты) и т.д.

Проанализировав основные причины несчастных случаев [2], можно сделать общий вывод, что большинство причин травматизма непосредственно связано с человеческим фактором, что подтверждается данными Минтруда [5]. Это свидетельствует о том, что порядка 70% несчастных случаев происходят не из-за недостатков в оборудовании или условиях труда, а в результате ошибок, невнимательности или нарушения правил безопасности самими работниками.

Анализ зависимости травматизма работников от стажа, предоставленный ВНИИ Труда, позволяет сделать вывод, что в основном подвержены смертельному травматизму работники, которые только приступают к профессиональной деятельности, в первый год после прошедшего обучения – порядка 24% (рис. 1) [6]. Вывод о том, что почти четверть погибающих работников имеют стаж менее одного года, подчеркивает важность внедрения эффективных программ обучения и наставничества для новых сотрудников. Это свидетельствует о том, что неопытные работники более уязвимы к рискам и часто не осознают всех опасностей, связанных с их трудовой деятельностью.

Рисунок 1 – Зависимость смертельного травматизма от стажа работников по данным ВНИИ Труда, 2021-2023 гг.

Подтверждением официальной статистики являются фотографии рабочего дня работников с высоким риском падения с высоты, выполненные авторами при научно-исследовательских выездах на строительные площадки города Санкт-Петербурга. Исследования подтверждают допущение работниками таких опасных действий, как (рис. 2, слева направо): выбор неверной точки крепления страховочного стропа к привязи, отсутствие страховочной системы в непосредственной близости от перепада по высоте более 2 метров или при ограждении высотой менее 1,1 метра, использование монтажного (предохранительного) пояса при выполнении работ с риском падения с высоты (согласно [7] запрещено использование предохранительных поясов), загромождение проходов и т.д.

Опасное действие (ОД) – это зафиксированное/незафиксированное осознанное/неосознанное нарушение работником требований охраны труда (действие/бездействие), которое потенциально может привести к происшествию, такому как ухудшение здоровья, травма или смерть работника (авторское определение на основе ГОСТ Р ИСО 45001-2020 [8]).

На рисунке 3 приведена пирамида, которая представляет собой модель, иллюстрирующую собой взаимосвязь между различными уровнями происшествий – от опасных действий до смертельных несчастных случаев. Впервые разработана в 1931 году Г.У. Хайнрихом на основе статистики травматизма [9, 10]. Далее данная пирамида была усовершенствована исследованиями Ф. Берда в 1966 году и подтверждена исследованиями компании DuPont.

Основная идея модели, заложенной в пирамиде, заключается в том, что предотвращение опасных действий, лежащих в основании пирамиды, может значительно снизить вероятность происшествий с серьезными последствиями. Пирамида служит инструментом для анализа травматизма и выявления областей, требующих внимания для повышения безопасности на рабочем месте.

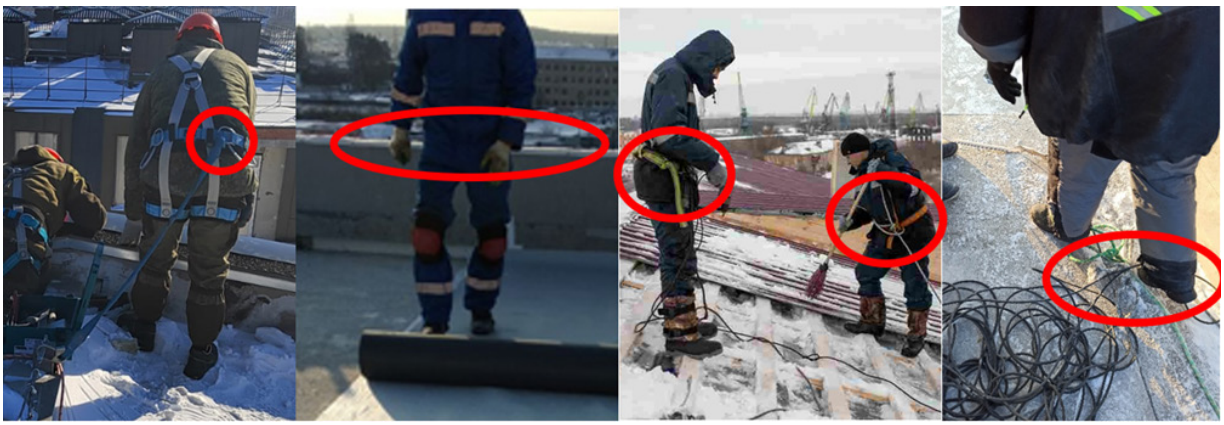


Рисунок 2 – Зафиксированные опасные действия работников с высоким риском падения с высоты в рамках выездов на строительные площадки г. Санкт-Петербурга

Рисунок 3 – Статистическая пирамида происшествий

Методология. Исходя из приведенных выше данных можно сделать вывод, что для увеличения безопасности труда на строительных площадках необходимо взять на особый контроль работников со стажем менее 1 года с повышенным риском падения с высоты. За основу для повышения безопасности необходимо взять уменьшение количества опасных действий работников.

Целью данной статьи является разработка метода оценки профессионального риска работников, выполняющих работы на высоте в строительной отрасли, основанного на усиленном контроле за бригадами, в которых есть работники со стажем выполнения работ менее одного года. Оценку профессионального риска производственного травматизма данных работников с высоким риском падения с высоты в первый год профессиональной деятельности необходимо производить на основе мониторинга опасных действий с учетом повышенной вероятности возникновения опасности падения с высоты. Результаты апробации разработанного метода проанализированы при помощи таблиц *Excel*, составлены графики.

Результаты. За основу для разработки метода оценки профессионального риска для работников строительной отрасли с высоким риском падения с высоты был взят проект СТО НОСТРОЙ 8.1.2-2023, разработанный кафедрой техносферной безопасности СПбГАСУ. Проект данного стандарта содержит в себе Примерное Положение об управлении рисками с методикой оценки профессиональных рисков, рекомендуемой для применения в организациях строительной сферы.

Согласно СТО оценка профессиональных рисков производится матричным методом на основе балльной оценки по формуле 1:

$$R = B \times T \quad (1)$$

где: R – уровень риска (баллы);

B – вероятность реализации негативного события (балл);

T – тяжесть причиненного вреда/последствий (балл).

Авторами предлагается корректировка данной методики в части уточнения вероятности возникновения опасности «падение с высоты» для работников со стажем менее одного года – вероятность возникновения опасности должна зависеть от стажа работника (табл. 1, 2).

Таблица 1 – Оценка профессионального риска по опасности «падение с высоты» без привязки к стажу работника (согласно СТО НОСТРОЙ 8.1.2-2023)

Выявление опаностей, опасных ситуаций	Идентификация («+»; «-»,«N/a»)	Оценка вероятности возникновения опасности – В, балл	Оценка тяжести последствий – Т, балл	Оценка риска R = B x T	Категория риска	Управление риском
Падение с высоты, падение предметов	+	3	4	12	Высокий (II)	Разработка плана корректирующих мероприятий для снижения риска до уровня III

Таблица 2 – Предложение по корректировке оценки профессионального риска по опасности «падение с высоты» – вероятность возникновения опасности зависит от стажа работника

Выявление опасностей, опасных ситуаций	Идентификация («+»; «-»,«N/a»)	Оценка вероятности возникновения опасности – В, балл	Оценка тяжести последствий – Т, балл	Оценка риска R = B x T	Категория риска	Управление риском
Падение с высоты, падение предметов (стаж более 1 года)	+	3	4	12	Высокий (II)	Разработка плана корректирующих мероприятий для снижения риска до уровня III
Падение с высоты, падение предметов (стаж менее 1 года)	+	5	4	20	Неприемлемый (I)	Разработка и внедрение корректирующих мероприятий для снижения риска до уровня II или III как можно быстрее

Таким образом, согласно предложенным корректировкам, подрядные организации, выполняющие работы на высоте и имеющие в своем штате работников со стажем профессиональной деятельности менее одного года, при проведении обязательной процедуры оценки профессионального риска [11] устанавливают «неприемлемый» риск падения с высоты, что означает необходимость разработки и внедрения корректирующих мероприятий для снижения риска до более низкого уровня как можно быстрее.

Одним из таких корректирующих мероприятий может быть внедрение усиления контрольно-надзорных функций со стороны генерального подрядчика за бригадами, имеющими работников со стажем менее одного года. Результаты усиленного контроля за такими бригадами можно использовать как метод определения компетентности работников с высоким риском падения с высоты.

Суть метода заключается в выявлении генеральным подрядчиком бригад, имеющих в штате работников с профессиональным стажем менее одного года, при заключении Акта-допуска с подрядной организацией [12]. Так как риск падения с высоты априори оценивается для таких бригад как «неприемлемый», то внедряется усиленный контроль за бригадой со стороны специалиста по охране труда генерального подрядчика на срок до двенадцати

месяцев (или до момента окончания работ подрядной организацией, если этот срок составляет менее 12 месяцев). Подобный инспекционный контроль и так проводится генеральным подрядчиком, но реже. Авторы же предлагают выходить на проверку к данным бригадам не реже одного раза в неделю, с целью своевременного выявления опасных действий, которые могут привести к падению с высоты. В рамках контроля специалист по охране труда фиксирует опасные действия, допускаемые работниками, и ежемесячно проводит переоценку профессионального риска для бригады по методике, описанной ниже.

Мониторинг опасных действий работников на строительных площадках можно назвать одним из ключевых элементов обеспечения безопасности труда. Он позволяет выявить потенциальные риски и опасные ситуации до того, как они приведут к несчастному случаю. Регулярные проверки и наблюдения за работниками позволяют определить, соблюдаются ли требования безопасности, используются ли средства индивидуальной защиты и т.д. Также, когда работники видят, что их действия находятся под вниманием, они более склонны соблюдать установленные нормы и правила, что способствует повышению уровня осведомленности о потенциальных угрозах и важности безопасного поведения на рабочем месте.

Для оценки риска падения с высоты на основании мониторинга опасных действий, производимого специалистом по охране труда генерального подрядчика, предлагается уточнить методику оценки профессиональных рисков применительно к работникам с высоким риском падения с высоты путем переоценки показателей тяжести последствий и вероятности возникновения опасности падения с высоты, в следующем виде (2):

$$R = B_{выс} \times T_{выс} \quad (2)$$

где R – балльная оценка профессионального риска;

$T_{выс}$ – тяжесть последствий опасных действий;

$B_{выс}$ – вероятность получения травмы работником.

Тяжесть последствий опасных действий работника с высоким риском падения с высоты ($T_{выс}$) оценивается при помощи таблицы 3, где собраны 9 самых распространенных опасных действий, которые приводят к нежелательному событию. Для определения градации тяжести последствий различных опасных действий при выполнении работ на высоте (установки балла тяжести) авторами был собран пул экспертов, имеющих опыт профессиональной деятельности, связанный с выполнением работ на высоте, с обучением сотрудников в данной области. Эксперты предоставили компетентные экспертные мнения, в которых расположили различные нарушения правил безопасности по порядку возрастания тяжести последствий от их нарушения.

Вероятность получения травмы работником с высоким риском падения с высоты ($B_{выс}$) устанавливается в зависимости от количества допущенных бригадой определенных опасных действий в течение месяца наблюдений (табл. 4). Данная ориентировочная зависимость была введена авторами в результате анализа актов о несчастных случаях на производстве – сколько опасных действий было допущено работником перед падением с высоты (анализировались причины несчастных случаев).

Таблица 3 – Тяжесть последствий опасных действий работника с высоким риском падения с высоты

Опасное действие	Тяжесть последствий опасных действий работника ($T_{выс}$), в баллах
1. Отсутствие крепления страховочной системы к анкерной точке при расстоянии менее 2 м от перепада по высоте	5
2. Использование ненадежных конструкций для анкерного крепления страховочной системы	4
3. Использование неверной точки крепления на страховочной привязи для соединения с соединительно-амортизационной подсистемой	
4. Использование неправильных /неподходящих для поставленной задачи СИЗ от падения с высоты	3
5. Отсутствие проверки качества и исправности перед применением / применение неисправных СИЗ от падения с высоты	
6. Отсутствие ограждения у перепада по высоте /высота ограждения менее 1.1 м / ненадежное ограждение	2
7. Выполнение работ в неблагоприятных метеорологических условиях	
8. Накапливание неиспользуемых материалов / загромождение проходов	1
9. Выполнение работ в неудовлетворительном состоянии здоровья	

Таблица 4 – Вероятность возникновения опасности у работников с высоким риском падения с высоты

Количество опасных действий за период	Вероятность получения травмы ($B_{выс}$), в баллах
более или равно 5	5
4	4
3	3
2	2
менее или равно 1	1

На основании мониторинга опасных действий и приведенных таблиц производится ежемесячный расчет риска падения с высоты для бригад, имеющих в штате работников со стажем менее одного года по формуле 3:

$$R = (B_{выс1} \times T_{выс1} + B_{выс2} \times T_{выс2} + B_{высп} \times T_{высп}) / n \quad (3)$$

Где R – риск падения с высоты в баллах,

$B_{высп}$ – вероятность получения травмы от выполнения конкретного опасного действия;

$T_{высп}$ – тяжесть последствий конкретного опасного действия;

n – количество разных опасных действий из градации (табл. 3).

Например, если за месяц наблюдений у бригады выявлено два опасных действия «Использование ненадежных конструкций для анкерного крепления страховочной системы» и четыре опасных действия «Отсутствие проверки качества и исправности перед применением / применение неисправных СИЗ от падения с высоты», то, согласно формуле 3, риск падения с высоты работников данной бригады за этот месяц будет рассчитан следующим образом:

$R = (2 \times 4 + 4 \times 3) / 2 = 10$ баллов.

Согласно СТО НОСТРОЙ 8.1.2-2023 профессиональный риск равный 10 относится к категории «Высокий» (табл. 5).

Таблица 5 – Уровень риска в зависимости от балльной оценки

Обозначение области риска	Уровень риска	Диапазон риска, баллы
I	Неприемлемый риск	12-25
II	Высокий риск	5-12
III	Средний риск	2-5
IV	Низкий риск	0-2

Таким образом производится мониторинг опасных действий и ежемесячный пересчет уровня профессионального риска падения с высоты для бригад, имеющих в штате работников со стажем менее одного года. Подобный мониторинг устанавливается на срок до 12 месяцев, по результатам мониторинга и переоценки рисков делаются выводы о корректирующих мероприятиях.

Мероприятия по снижению уровня риска:

1) Если бригада в рамках мониторинга попадает в зону неприемлемого риска – предписание от специалиста по охране труда генерального подрядчика – отстранение бригады от выполнения работ и направление на внеплановое обучение безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте.

2) Если бригада в рамках мониторинга остается в рамках высокого риска – продолжение мониторинговых мероприятий до 12-ти месяцев или до завершения работ бригадой.

3) Если в рамках мониторинга и переоценки риска падения с высоты уровень риска переходит в средний – принимается решение об отмене усиленных контрольных мероприятий для бригады. Условно считается, что бригада подтвердила свою компетентность в вопросах безопасного выполнения работ на высоте.

Обсуждение. С целью апробации методики, описанной выше, в рамках выполнения научно-исследовательской работы проанализирована работа 3-х бригад, выполняющих фасадные, монолитные и кровельные работы (то есть с высоким риском падения с высоты), имеющих работников со стажем менее одного года (продолжительность наблюдений – 12, 4 и 7 месяцев соответственно). Ежемесячный расчет риска падения работников с высоты производился по методике, описанной выше. Результаты наблюдений сведены в таблицу *Excel* и по каждой бригаде выглядят следующим образом (рис. 4).

Результаты мониторинга опасных действий трех бригад работников с высоким риском падения с высоты сведены в график (рис. 5).

Бригада 2

Месяц наблюдений	Опасные действия бригады		
	Количество опасных действий	Категория тяжести	Коэф.тяжести опасного действия
1	4	3	4
	5	4	3
	2	1	5
2	4	4	3
	5	9	1
	5	2	4
3	4	5	3
	6	4	3
	3	2	4
4	3	1	5
	4	3	4
	6	5	3
	1	4	3

Рисунок 4 – Учет количества различных опасных действий за 4 месяца наблюдений у Бригады 2

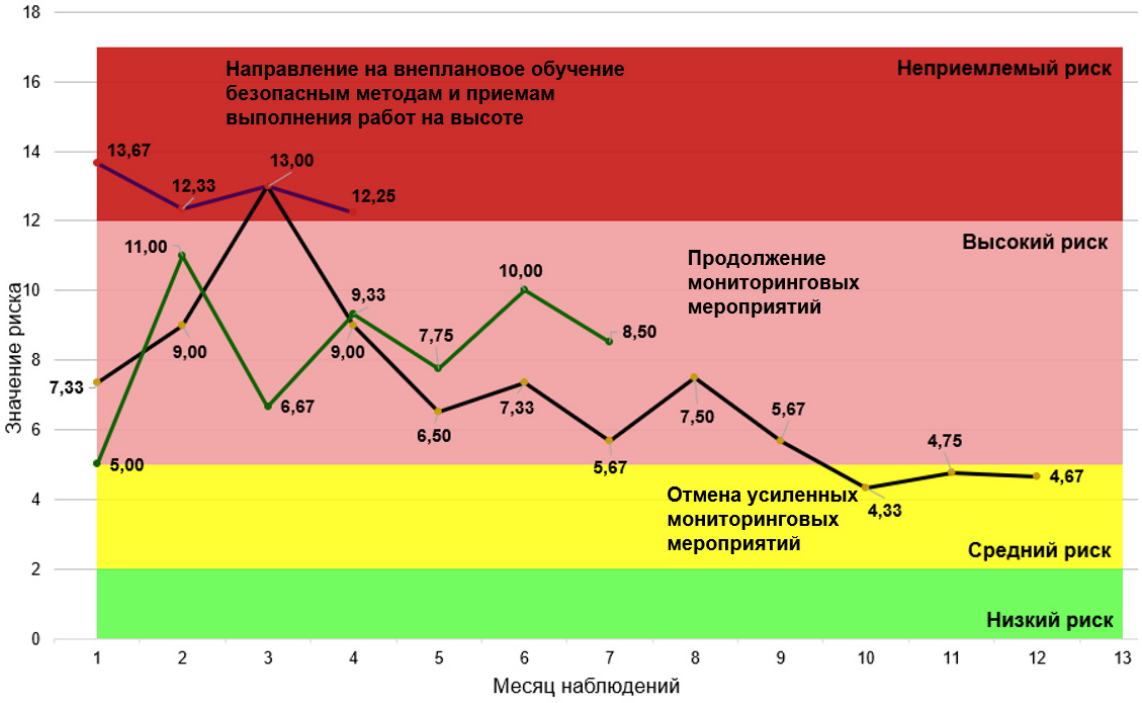


Рисунок 5 – Сводные результаты ежемесячной переоценки риска падения с высоты на основе совершаемых опасных действий трех бригад работников (черная линия – бригада 1, фиолетовая линия – бригада 2, зеленая линия – бригада 3)

По итогам данного мониторинга можно сделать следующие выводы по трем бригадам, подвергшимся усиленному контролю со стороны специалиста по охране труда от генерального подрядчика:

1) Бригада 1, начиная с 10-го месяца наблюдений, перешла в категорию среднего риска, что указывает на возможность отмены усиленных мониторинговых мероприятий и подтверждении компетентности в вопросах обеспечения безопасности выполнения работ на высоте. В то же время, попадание на 3м месяце в категорию неприемлемого риска может расцениваться как необходимость дополнительного обучения уже на третьем месяце работы бригады.

2) Бригада 2 – находится в зоне неприемлемого риска. Это влечет предписание от специалиста по охране труда генерального подрядчика – отстранение бригады от выполнения работ и направление на внеплановое обучение по охране труда.

3) Бригада 3 все время наблюдений находится в зоне высокого риска, что говорит о невозможности отмены мониторинговых мероприятий, продолжение наблюдения до 12ти месяцев / окончания работ бригадой / перехода в зону среднего риска.

Выводы. В современном мире, где строительство и промышленность играют ключевую роль в экономике, безопасность работников остается одним из главных приоритетов. Предложенный метод определения уровня профессионального риска падения с высоты позволяет точечно взаимодействовать с опасностью, которая чаще всего приводит к летальным травмам на строитель-ной площадке – вероятность падения с высоты.

Анализируя различные методы «борьбы» с несчастными случаями по вине человеческого фактора, можно сделать вывод, что два основных направления действий это усиление контроля за соблюдением работниками требований охраны труда на рабочих местах или изменение подходов к обучению работников.

Предложенный в данной статье метод оценки профессионального риска падения с высоты как раз может быть одним из действенных способов контроля за соблюдением требований охраны труда работниками, так как основан на усиленном мониторинге за действиями бригады. Предполагается, что повышенное внимание к действиям работников, только приступающим к профессиональной деятельности в сфере выполнения работ с высоким риском падения с высоты, позволит изменить устоявшуюся годами статистику – снизить количество тяжелых и смертельных несчастных случаев по причине падения с высоты.

Эффективный контроль не только способствует снижению числа несчастных случаев, но и формирует культуру безопасности работников, повышая уровень ответственности работников за собственную безопасность и безопасность окружающих. Регулярные проверки, обучение и информирование о потенциальных опасностях создают условия для предотвращения инцидентов, что в свою очередь способствует сохранению здоровья сотрудников и снижению затрат на лечение и компенсации. В конечном итоге, инвестирование в контроль охраны труда при работах на высоте – это не только соблюдение законодательства, но и проявление заботы о людях, что укрепляет доверие

и мотивацию работников.

В качестве продолжения научной работы, посвященной опасным действиям, допускаемых работниками, целесообразно изучить отношение работников к тем или иным опасным действиям – какие действия сами работники считают опасными, а какие, по их мнению, не могут привести к травмированию на рабочем месте. Частично исследование отношения к опасностям было описано в [4], целесообразно его дополнить исследованием остаточных знаний работников. Очевидно, что должна быть связь между опасными действиями работников и отсутствием знаний о безопасных методах и приемах выполнения работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Мониторинг условий и охраны труда в Российской Федерации – 2018-2023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eisot.rosmintrud.ru/monitoring-uslovij-okhrany-truda (дата обращения 10.05.2025).

2. Охрана труда в цифрах. ВНИИ Труда Минтруда России [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://s.vcot.info/document/poleznoe/media/5/66d99c1a16c0e568797996.pdf (дата обращения 08.07.2025).

3. Субботина Н.А. О возможности использования систем захвата движений в рамках обучения безопасным методам и приемам выполнения работ на высоте // Сборник научных трудов «Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», 2025. Вып. 1. ISSN 2218-5194. – С. 326-343.

4. Субботина, Н.А. Отработка практических навыков в процессе обучения методам и приемам выполнения работ на высоте в строительстве: проблемы и перспективы / Н.А. Субботина, Н.Н. Даль // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 260-273. – EDN VFUCZT.

5. Замминистра Григорий Лекарев: Большинство несчастных случаев на производстве вызвано «человеческим фактором». Официальная информация сайта Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 апреля 2019 г. https://rosmintrud.ru/labour/safety/307 (дата обращения: 3.07.2025).

6. 5 правил предотвращения смертельных несчастных случаев, вебинар ВНИИ Труда от 18 сентября 2023 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rutube.ru/video/f3d9a6a27e918ddab691a24cf49823ee/?playlist=661094 (дата обращения 06.02.2025).

7. Правила по охране труда при работе на высоте (п. 132): утв. Приказом М-ва труда и соц. защиты России от 16 ноября 2020 №782н // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371453/ (дата обращения 15.06.2025).

8. ГОСТ Р ИСО 45001-2020 Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования и руководство по применению: нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие Приказом Федер. агенства по техническому регулированию и метрологии от 28 августа 2020 г. № 581-ст : взамен ГОСТ Р 54934-2012/ OHSAS 18001:2007: дата введения 2021-04-01 // Кодекс: электрон. фонд правовой и нормативно-технической информации. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200175068 (дата обращения 05.08.2025).

9. Heinrich H.W. Industrial accident prevention: A scientific approach. 4th Ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1959. – 480 p.

10. Захаров П., Пересыпкин С. Культура безопасности труда: Человеческий фактор в ракурсе международных практик. М.: Интеллектуальная литература, 2019. – 128 с.

11. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации (статьи 214, 218): Федеральный закон № 197-ФЗ: принят Государственной Думой 21 декабря 2001 г.: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года: ред. от 31.07.2025 // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения 02.06.2025).

12. Правила по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте (п. 17): утв. Приказом М-ва труда и соц. защиты России от 11 декабря 2020 № 883н // КонсультантПлюс: сайт. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_372506/ (дата обращения 16.06.2025).

Статья публикуется по результатам исполнения гранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 2025 года.

Статья поступила в редакцию 06.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025

УДК 614.8.084
EDN: EMWZAO

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ НА РАБОЧИХ МЕСТАХ С ТЕРРИТОРИАЛЬНО МЕНЯЮЩИМИСЯ РАБОЧИМИ ЗОНАМИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3166-5370
AuthorID: 1026812
ORCID: 0000-0002-8392-1790
ResearcherID: F-9934-2019
ScopusID: 57210916868

ЛОГВИНОВА Юлия Валерьевна, кандидат технических наук,
старший преподаватель Высшей школы техносферной безопасности
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, e-mail: logvinova_yuv@spbstu.ru)

SPIN: 4384-6596
AuthorID: 703704
ORCID: 0000-0003-0173-1836
ResearcherID: R-4230-2017
ScopusID: 57202055674

УЛЬЯНОВ Алексей Игоревич, кандидат технических наук,
доцент Высшей школы техносферной безопасности
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, e-mail: ulyanov_ai@spbstu.ru)

SPIN: 4537-1183
AuthorID: 1048304
ORCID: 0000-0003-2722-5552
ResearcherID: AAE-1582-2019
ScopusID: 57212553296

ПОЛЮХОВИЧ Максим Алексеевич, кандидат технических наук,
старший преподаватель Высшей школы техносферной безопасности
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, e-mail: polyuhovich_ma@spbstu.ru)

SPIN: 9967-4239
AuthorID: 536365
ORCID: 0000-0001-5045-6282
ResearcherID: L-6450-2018
ScopusID: 57205429344

РУМЯНЦЕВА Нина Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент,
доцент Высшей школы техносферной безопасности
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б, e-mail: rumyantseva_nv@spbstu.ru)

Аннотация. Колебания параметров климата и освещенности создают большой спектр опасностей на рабочих местах с территориально меняющимися рабочими зонами, что требует учета данных особенностей при оценке показателей производственной среды. Методы оценки, основанные на психофизическом законе Вебера-Фехнера, применимы для работников, задействованных на рабочих местах с территориально меняющимися рабочими зонами на открытой территории в строительстве, горнодобывающей, энергетической, сельскохозяйственной отраслей. В основу метода положена количественная оценка динамических факторов окружающей среды на открытой территории (температура, влажность, скорость движения воздуха, давление, освещенность) с учётом нормативных значений для учета восприятия человеком изменения внешних условий. Полученный метод включает алгоритм, позволяющий на основе оценки показателей разработать дополнительные мероприятия для нейтрализации потенциальных угроз из-за меняющихся метеорологических условий. Такой подход является превентивной мерой оценки профессиональных рисков, который позволяет спрогнозировать вероятность реализации негативных событий из-за неконтролируемых человеком климатических и световых условий. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации системы управления охраной труда на предприятиях и разработки персонализированных рекомендаций в отраслях с повышенными профессиональными

рисками на рабочих местах с территориально меняющимися рабочими зонами.

Ключевые слова: климатические условия, коэффициент, световая среда, психофизический закон Вебера-Фехнера, математическое моделирование, алгоритм, уровень опасности, производственная среда, идентификация, компенсирующие мероприятия.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE PERFORMANCE OF THE PRODUCTION ENVIRONMENT IN WORKPLACES WITH GEOGRAPHICALLY CHANGING WORK ZONES

© The Author(s) 2025

LOGVINOVA Yulia Valeryevna, candidate of technical sciences,
senior lecturer of the Higher School of Technoshere Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B, e-mail: logvinova_yuv@spbstu.ru)
ULJANOV Alexey Igorevich, candidate of technical sciences,
associate professor of the Higher School of Technoshere Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B, e-mail: ulyanov_ai@spbstu.ru)
POLYUKHOVICH Maxim Alekseevich, candidate of technical sciences,
senior lecturer of the Higher School of Technoshere Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B, e-mail: polyuhovich_ma@spbstu.ru)
RUMYANTSEVA Nina Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the Higher School of Technoshere Safety
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B, e-mail: rumyantseva_nv@spbstu.ru)

Abstract. Fluctuations in climate and lighting parameters create a wide range of hazards in workplaces with geographically changing work zones, which requires taking these features into account when assessing the indicators of the production environment. Assessment methods based on the Weber-Fechner psychophysical law are applicable to workers involved in workplaces with geographically changing work zones in open areas in the construction, mining, energy, and agricultural industries. The method is based on a quantitative assessment of dynamic environmental factors in an open area (temperature, humidity, air velocity, pressure, illumination), taking into account standard values for taking into account human perception of changes in external conditions. The resulting method includes an algorithm that allows, based on the assessment of indicators, to develop additional measures to neutralize potential threats due to changing meteorological conditions. This approach is a preventive measure for assessing occupational risks, which makes it possible to predict the probability of negative events occurring due to climate and light conditions uncontrolled by humans. The results of the work can be used to optimize the occupational health and safety management system at enterprises and develop personalized recommendations in industries with increased occupational risks in workplaces with geographically changing work zones.

Keywords: climatic conditions, coefficient, light environment, Weber-Fechner psychophysical law, mathematical modeling, algorithm, hazard level, production environment, identification, compensating measures.

Для цитирования: *Логвинова Ю.В. Разработка метода оценки показателей производственной среды на рабочих местах с территориально меняющимися рабочими зонами / Ю.В. Логвинова, А.И. Ульянов, М.А. Полюхович, Н.В. Румянцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025 – Т. 14 – № 3(71). – С. 290-296. – EDN: EMWZAO.*

Введение. Одной из серьезнейших проблем безопасности труда в Российской Федерации является высокий уровень производственного травматизма и профессиональной заболеваемости, что влечет за собой дефицит трудоспособного населения, приводит к снижению экономических показателей предприятий и оказывает негативное влияние на темпы развития страны. В производственной сфере человек – главный элемент, состояние которого напрямую влияет на функционирование технологического процесса. Особенно стоит отметить людей, которые трудятся на рабочих местах (далее РМ) с территориально меняющимися рабочими зонами. На данных РМ существует ряд нерешёнными задач обеспечения безопасности связанных с постоянными перемещениями людей в своих рабочих зонах [1-3]. На открытых территориях выполняют свои трудовые функции работники в промышленности и сельском хозяйстве. В этих условиях на них влияют нестандартные, а иногда экстремальные климатические факторы. К профессиям, для которых данная проблема является актуальной, относятся электрогазосварщик, строитель, электромонтёр, промышленный альпинист, пожарный и др. Актуальные проблемы методологии проведения оценки профессиональных рисков, являющейся неотъемлемой частью риск-ориентированного подхода к управлению безопасностью на

РМ, в частности, нестационарных, продиктованы научно-техническим прогрессом и требуют новых и более широких представлений об условиях труда и факторах, воздействующих на работников. РМа с территориально меняющимися рабочими зонами характеризуются наличием определенного набора вредных и опасных факторов, например, пыли, светового излучения, высокой или низкой температуры, теплового и ультрафиолетового излучения и т.д. [4-5].

Особенности условий труда на РМ с территориально меняющимися рабочими зонами требуют разработки инновационных подходов к оценке производственной среды. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью минимизации рисков для здоровья работников, связанных с динамическим воздействием климатических и световых факторов. Несмотря на значительный прогресс в научных исследованиях по решению данной задачи, требуется систематизация методов оценки совокупного влияния параметров окружающей среды, что позволит перейти к прогнозированию и предотвращению профессиональных рисков.

Для обеспечения безопасности труда работников в настоящее время предлагаются различные подходы и методы:

– методы имитационного моделирования различных опасных ситуаций, направленные на снижение травматизма путём тренировки персонала с использованием *VR*-технологий [11-12];

– матрично-индексный подход для дифференциации рисков и оценки вероятности их возникновения с целью дальнейшего снижения травматизма, например, на объектах строительства [13];

– метод Файна и Кинни, который учитывает вероятность возникновения опасностей и их проявления на определенных РМ [14];

– метод вербально-балльного ранжирования при оценке риска, позволяющий разработать совокупность критериев принятия решений и внедрить мероприятия по безопасности труда [15];

– подходы по организации систем непрерывного обучения, позволяющие развивать необходимые компетенции у работников, которые повышают уровень безопасности труда [16];

– использование умных (*smart*) средств защиты, которые позволяют собирать данные о функционировании людей на своих РМ и производить их анализ для повышения эффективности управления охраной труда [17];

– методы, использующие медицинские показатели работников, например учет анализа данных по изменению сердечного ритма сотрудников [17].

Климатические условия, такие как температура, влажность, скорость ветра и атмосферное давление, в сочетании с освещённостью рабочего места, напрямую влияют на безопасность труда. Их комбинированное воздействие и превышение нормативных уровней повышает вероятность травматизма и снижает эффективность трудовой деятельности. Однако, существующие нормативы зачастую не учитывают пространственно-временную изменчивость этих параметров, что особенно критично для работников, чьи зоны деятельности распределены на обширных территориях (строительные площадки, логистические комплексы, сельское хозяйство).

Перечисленные выше подходы и методы, в целом, применимы к рассматриваемым РМ, но не в полной мере позволяют оценить показатели производственной среды для разработки комплекса мероприятий [18-19]. Обеспечение безопасности труда на нестационарных РМ должно основываться на принципах, заложенных в законе Вебера-Фехнера, что позволяет установить математическую зависимость между физической интенсивностью стимула и воспринимаемой интенсивностью чувственного восприятия (ощущения) человеком в условиях нахождения работника на открытой территории.

Практические аспекты применения закона Вебера-Фехнера довольно обширные, например, он применяется для определения размера премиальной части заработной платы вне зависимости от используемой системы оплаты труда [20], оценки роли водителя в обеспечении транспортной безопасности [21], демонстрации интенсивности реакции потребителя на предлагаемый товар [22], изучения восприятия звука человеком [23], совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок [24].

Постоянное или периодическое пребывание работников на открытых производственных площадках способствует воздействию на них природно-климатических факторов, которые недооценены как в системе нормирования, так и контроле над условиями труда [25-27]. Комбинированное воздействие факторов повышает физические нагрузки и требует адаптации используемых средства защиты, что устанавливает особые требования к формированию производственной среды. Таким образом, требуется разработка методов и методик, учитывающих все вышеперечисленные особенности для РМ с территориально меняющимися рабочими зонами. Для достижения цели необходимо разработать метод оценки показателей производственной среды.

В настоящее время проблеме оценки профессионального риска посвящено большое число исследований, из них наиболее значимый вклад в данное направления сделали С.Л. Пушенко [28], Г.З. Файнбург [29], В.М. Минько [30], В.С. Сердюк [31].

В своих работах исследователи указывают на ряд аспектов, связанных с проблемой оценки и управления профессиональными рисками:

– необходимость обоснования методологии оценки профессиональных рисков;

– использование качественных статистических данных;

– необходимость выбора математических мо-

делей, отражающих воздействие производственной среды на работников;

– учет человеческого фактора при оценке профессиональных рисков.

Таким образом, исследования по оценке профессиональных рисков затрагивают большое число вопросов, но в них недостаточно подробно рассмотрено решение задач оценки производственной среды на РМ с территориально меняющейся рабочей зоной.

Методология. Методы оценки профессиональных рисков, установленные законодательством РФ не адаптированы к применению на РМ, где динамично меняется состояние производственной среды. Рассмотрим особенности организации РМ в зависимости от характеристик, определяющих динамику изменения производственной среды.

Рабочее место с зафиксированной принадлежностью к одному работодателю (более одного месяца) и постоянным составом оборудования является стационарным. РМ располагаются в зданиях и сооружениях, и подключены к необходимым инженерным сетям.

Отличительная особенность РМ с территориально меняющейся рабочей зоной заключается в том, что часть рабочего пространства, оснащённая средствами производства, перемещается в процессе выполнения технологических операций и приводит к изменению параметров условий труда на разных участках открытой территории. У рабочих, находящихся на таких РМ, появляется период адаптации к постоянно меняющимся параметрам производственной среды. Появление динамично изменяющейся рабочей зоны влечет к возникновению на РМ определенного набора дополнительных проблем: колебание показателей производительности труда и проявление факторов производственной среды приобретают вид стохастического процесса, что осложняет обеспечение безопасности труда.

В данном исследовании введено ограничение, что под производственной средой понимаются климатические и световые условия в рабочей зоне территориально меняющегося рабочего места на открытой территории.

Предлагается разработать математическую модель для оценки негативного влияния факторов производственной среды. В исследованиях по оценке профессиональных рисков опираются на следующие основные законы, описывающие функционирование системы «человек – производственная среда»:

– психофизические;

– закон сохранения энергии;

– законы термодинамики;

– законы оптики.

Реакцию на изменение климата и световых условий организма человека достаточно точно для задач оценки рисков описывает закон Вебера-Фехнера:

$$E = k \cdot lg\,(x / x_0), \quad (1)$$

где E – (стимул) ощущения человека;

x – раздражитель (баллы);

x_0 – допустимое значение раздражителя (баллы);

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности.

Исследования терморегуляции организма человека [2] установили, что теплоотдача через кожу пропорциональна разности температур в степени 4/5, что точнее отражает нелинейность восприятия перепадов температуры и соответствует масштабу натурального логарифма. На рисунке 1 приведены графики степенной функции и логарифмических функций (с десятичным и натуральным логарифмом), описывающие изменение стимула (ощущения человека) в зависимости от изменения интенсивности раздражителя.

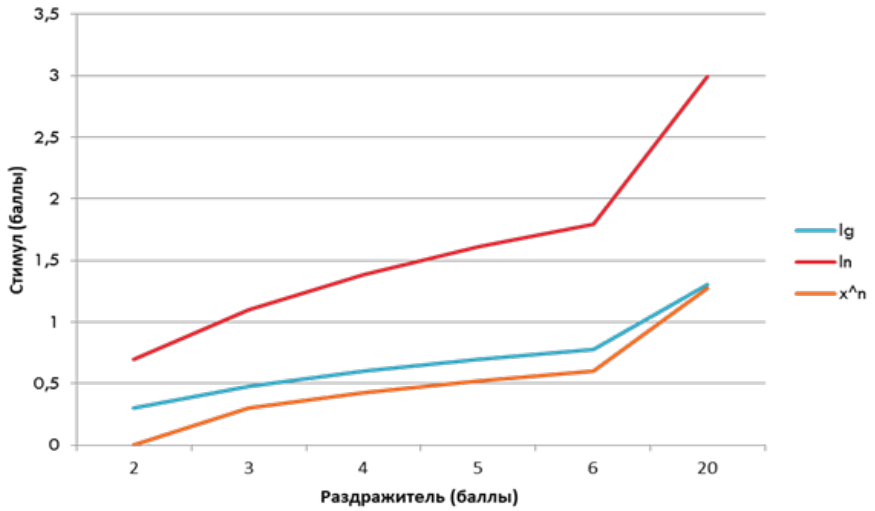


Рисунок 1 – Вид графиков изменения стимула от изменения интенсивности раздражителя при использовании функций lg, ln, x^n

Изучение подхода по определению негативного влияния факторов производственной среды в баллах показал, что для вычисления стимула (ощущения человека) в баллах рационально использовать функцию натурального логарифма. Использование функции десятичного логарифма и степенной функции приводит к искусственному занижению результатов, что не отражает реальный ущерб, наносимый организму человека при воздействии определенного вида раздражителя.

Результаты. Метод оценки показателей производственной среды реализуется по разработанному алгоритму (рис. 2), который позволяет реализовать цикл управления, заложенный в системном подходе к управлению охраной труда.

Рисунок 2 – Алгоритм оценки производственной среды

Условно алгоритм состоит из трех основных процедур:

1. Получение данных для РМ. Собираются данные о параметрах климата и освещенности рассматриваемых РМ (*t*, °С; количество осадков, мм; $V_{ветра}$, м/с; $P_{атм}$, $h_{осадков}$, мм. рт. ст.; *E*, лк; *Kn*, %; показатель ослеплённости, %).

2. Идентификация опасностей (используются критерии для г. Санкт-Петербурга).

Оптимальные критерии по световой среде (не контрастный, мягкий, рассеянный свет (облачно)):

– *E* = 300-600 лк;

– *Kn* = 15%;

– показатель ослеплённости – 20-40%.

Оптимальные климатические условия (на открытой территории):

– $V_{ветра}$ от 1,8 до 2,6 м/с;

– $h_{осадков}$ от 1,5 до 4 мм;

– $P_{атм}$ – 760 мм. рт. ст.

Температурные нормативы представлены в таблице 1 (рассчитаны за период 1991-2020 по г. Санкт-Петербург по данным Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в зависимости от месяца года).

Таблица 1 – Температурные нормативы, рассчитанные за период 1991–2020 по Санкт-Петербургу

Месяц	Значение, °С
январь	-4
февраль	-5
март	-1
апрель	5,2
май	11,5
июнь	16,1
июль	19,1
август	17,4
сентябрь	12,4
октябрь	6,2
ноябрь	0,9
декабрь	2,5

Идентифицируются опасности с использованием критериев из таблицы 1 следующим образом: если фактический показатели не превышает норматива – 0 (опасности нет), если показатели превышают норму – 1.

Расчет уровня опасности производственной среды (L) по модели:

$$L = ln\,(k_t * \sum x_i) / x_0, \quad (2)$$

где x_i – значение идентифицированных опасностей;

x_0 – допустимое значение совокупности показателей для производственной среды (значение равно 2);

k_t – безразмерный коэффициент, учитывающий нормальную среднесезонную температуру:

$$k_t = ln\,|t / t_0|\,, \quad (3)$$

где t – это фактическая температура;

t_0 – температурные нормативы (табл. 1).

Коэффициент k_t определяет разницу между фактической и нормативной температурой воздуха и позволяет количественно оценить потенциальные риски для здоровья работника, связанные с отклонением параметров в течение рабочего дня.

На основании значений коэффициента k_t могут быть разработаны и внедрены дополнительные мероприятия по индивидуальной защите работников, осуществляющих трудовую деятельность на открытых территориях. Мероприятия направлены на обеспечение безопасных условий труда и поддержание на высоком уровне производительности труда работников.

Диапазон изменения уровня опасности производственной среды: от 0,1 до 3 баллов. Присваивается малоопасный уровень опасности на рабочем месте,

если расчётное значение находится в диапазоне от 0,1 до 1. В данном случае выполнение работ допускается после получения запроса на их проведение.

При значении уровня опасности от 1,1 до 2 он классифицируется как умеренный. Присвоение такого уровня опасности требует осуществление производственного контроля до начала выполнения работ и постоянный мониторинг рабочего процесса.

Когда уровень опасности находится в диапазоне от 2,1 до 3, он классифицируется как высокий. В данной ситуации рекомендуется мониторинг параметров климата и освещенности перед началом выполнения работы, организация контроля за проводимыми операциями на РМ с территориально меняющейся рабочей зоной и определение дополнительных мероприятий по охране труда (ОТ) для снижения профессиональных рисков.

Когда уровень опасности больше 3 баллов, он классифицируется как чрезвычайный. В этом случае ограничивается время выполнения работ, проводятся дополнительные мероприятия по ОТ, организуется постоянный контроль за проведением работ и мониторинг метеорологических параметров климата и освещенности.

Обсуждение. Предложенный метод оценки показателей производственной среды можно применять в различных отраслях, где присутствуют РМ с территориально меняющейся рабочей зоной на открытой территории. К таким отраслям относят строительство, сельское хозяйство, добывающая промышленность. Специфика его использования обусловлена постоянным изменением метеорологических параметров на участках работ, сезонными колебаниями температуры и влажности, вариативностью скорости ветра и различиями атмосферного давления в зависимости от рельефа.

Практическая ценность метода заключается в комплексной оценке условий труда при перемещении работников на открытой территории.

Реализация метода требует регулярных замеров климатических условий в разных точках рабочей зоны, учета временных изменений, корректировки данных по перемещениям работников. Такой подход позволяет получить достоверную оценку РМ с территориально меняющимися рабочими зонами, критически важную для отраслей, технологические операции которых осуществляются в условиях открытых территорий.

Выводы. Предложенный метод оценки показателей производственной среды позволяет контролировать параметры климата и освещенности, что дает возможность достаточно быстро вводить дополнительные мероприятия, компенсирующие быстро изменяющиеся условия труда на РМ с территориально меняющимися рабочими зонами на открытой территории.

Следует отметить, что метод позволяет проактивно реагировать на возникающие опасности на РМ с территориально меняющимися рабочими зонами. Эффективность предложенного метода зависит от точности прогнозирования параметров климата и освещенности, что требует применения геоинформационных систем и их интеграцию с информационными системами по управлению ОТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шендакова Т.А. Повышение безопасности труда при сварочных работах в АПК // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. 2023. – №3 (34). – С. 4-9.

2. Иконникова Н.В., Гребеньков С.В., Бойко И.В., Никанов А.Н. Риски утраты профессионального здоровья у работников газотранспортного предприятия, действующего в условиях, приравненных к Крайнему Северу // Мед. труда и пром. экол. 2023. – №4. – С. 218-225.

3. Сергеева Н.Д., Галаганова В.В. Совершенствование научно-методических подходов к обеспечению роста производительности труда на трудоемких ручных операциях в строительном производстве // Вестник магистратуры. – 2023. – №1-2 (136). – С. 55-60.

4. Кузнецова А.Н., Хамидуллина Е.А. Моделирование при анализе рисков химических аварий // XXI век. Техносферная безопасность. – 2020. – №2 (18). – С. 173-186.

5. Ширванов Р.Б. Влияние уровня освещенности рабочих мест на условия труда (на примере Республики Казахстан) // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – №2 (22). – С. 189-200.

6. Елькин А.Б., Евсеева И.А. Оценка экономической эффективности мероприятий по безопасности и охране труда // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. – №2 (22). – С. 157-167.

7. Тимофеева С.С., Груздева О.Е. Профессиональные риски в строительстве и «регуляторная гильотина» // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – №2. – С. 32-43.

8. Ниязов А.Р. К вопросу о производственной безопасности и уровне травматизма на объектах электроэнергетики // Вестник ЮГУ. – 2025. – С. 38-42.

9. Хлыбова Ю.О. Анализ условий труда на рабочем месте электрогазосварщика на примере газораспределительной организации // Инновационная наука. – 2020. – №4. – С. 65-68.

10. Рябчикова И.А., Петюкова А.В. Профессиональные риски работников в авиационной промышленности // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – №1 (21). – С. 103-113.

11. Яковлева Е.В., Чубова Е.В. Снижение уровня травматизма с помощью внедрения виртуальной реальности в процесс обучения по охране труда // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. – 2023. – №3 (34). – С. 2-4.

12. Власов Р.Э., Фрумак И.В. Развитие компетенций работников учреждений в области охраны труда с помощью цифровых технологий // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами. – 2023. – №12. – С. 104-108.

13. Шарманов В.В., Симанкина Т.Л. Матрично-индексный подход в вопросах оценки уровня травматизма на объектах строительства // Вестник Научного центра. – 2022. – №1. – С. 75-82.

14. Ляпина О.П., Чаптыкова А.А. Методологические подходы к оценке профессиональных рисков в строительных организациях // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – №1. – С. 305-309.

15. Черный К.А., Файнбург Г.З., Розенфельд Е.А. Методологические проблемы проведения оценки профессиональных рисков на горнорудных предприятиях и их решение // Недропользование. – 2021. – №4. – С. 193-200.

16. Агошков А.И., Козлова О.В., Курочкин П.А., Сологубова С.В. Система непрерывного обучения работников в области безопасности и охраны труда для применения в процессе реализации инвестиционных проектов в строительных организациях // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – №2 (22). – С. 140-156.

17. Тимофеева С.С., Попова Н.А. Инновации в охране труда для нефтедобычи // XXI век. Техносферная

безопасность. – 2020. – №2 (18). – С. 198-210.

18. Тимофеева С.С., Груздева О.Е. Условия труда на объектах экономики иркутской области и реализация риск-ориентированного подхода // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – №1 (21). – С. 114-129.

19. Наянов П.А., Хамидуллина Е.А. Статистический анализ в управлении рисками на опасных производственных объектах нефтегазодобычи // XXI век. Техносферная безопасность. – 2020. – №4 (20). – С. 393-402.

20. Бацокин А.О., Макекадырова А.С. Применение закона Вебера-Фехнера в оплате труда персонала // МНИЖ. – 2020. – №4-2 (94). – С. 11-14.

21. Христофоров Е.Н., Сакович Н.Е. Свойства водителя и их влияние на безопасность движения транспортных средств // Транспортное машиностроение. – 2021. – №1 (98). – С. 34-42.

22. Тебекин А.В. Ретроспективный анализ проблем развития теории потребительского выбора и спроса // Теоретическая экономика. – 2020. – №9 (69). – С. 10-26.

23. Трубникова Е.В., Петонди Е.Л. Основные положения и подходы в изучении терапевтического воздействия музыки на человека // Вестник ТИУиЭ. – 2020. – №1 (31). – С. 78-81.

24. Марков В.А. Проблемы и перспективы совершенствования систем автоматического управления и регулирования теплоэнергетических установок // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2024. – №1 (148). – С. 128-155.

25. Мельцер А.В., Полякова Е.М., Якубова И.Ш., Ерастова Н.В., Кропот А.И. Разработка профилактических мероприятий при работе на открытой территории в холодный период года // Гигиена и санитария. – 2022. – №8. – С. 947-953.

26. Полякова Е.М., Мельцер А.В., Чащин В.П., Ерастова Н.В. Гигиеническая оценка вклада охлаждающих метеорологических факторов в формирование профессионального риска нарушений здоровья работающих на открытой территории в холодный период года // Анализ риска здоровью. – 2020. – №3. – С. 108-116.

27. Латышевская Н.И., Мирочник В.В., Левченко Н.В., Стець К.Ю., Руруа Л.П. Оценка тепловой нагрузки производственной среды при работе на открытых территориях в летний период года (на примере предприятий нефтедобычи) // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2022. – №1. – С. 45-49.

28. Пушенко С.Л., Гапонов В.Л., Кукареко В.А. Анализ производственного травматизма в строительной индустрии и пути его снижения // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 2. – С. 24-30.

29. Файнбург Г.З., Розенфельд Е.А. Разработка методологии оценки совокупного риска комплекса опасностей подземных горнодобывающих предприятий // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 1-1. – С. 108-125.

30. Минько В.М., Пискун Р.И. О факторах опасности и профессиональных рисков на танкерном флоте // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 6 (282). – С. 3-8.

31. Бакико Е.В., Зонова Н.О., Кулешов В.В., Сердюк В.С., Фомин А.И. Влияние профессиональной компетентности специалистов в области охраны труда на управление профессиональными рисками с учетом человеческого фактора // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2023. – № 4. – С. 68-78.

Статья поступила в редакцию 27.08.2025
Статья принята к публикации 16.09.2025