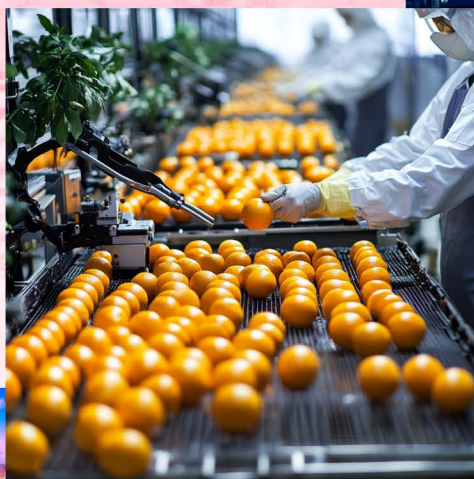


vek21.penzgtu.ru

18+

ISSN 2221-951X

XXI век : ИТОГИ ПРОШЛОГО И ПРОБЛЕМЫ НАСТОЯЩЕГО *плюс*



2025

№1(69) т.14





XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего *плюс*

Учредитель – ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Главный редактор

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

Заместители главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

Ответственный секретарь

Коростелева Анна Владимировна, кандидат технических наук

© ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», 2025

Основан в 2011 г.

18+

Том 14
№ 1 (69)
2025

Журнал выходит
4 раза в год

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

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

Компьютерная верстка:
В.В. Зупарова

Технический редактор:
В.В. Зупарова

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

Подписано в печать 21.03.2025.

Выход в свет 28.03.2025.

Формат 60X84 1/8

Печать ризография.

Усл. печ. л. 26,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 305.

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

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

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

Заместители главного редактора:

Авrorов Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Пищевые производства»

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Ефремова Сания Юнусовна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Мотовилов Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, начальник отдела пищевых систем и биотехнологий, главный научный сотрудник

(Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия)

Пашенко Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, ректор

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Политаева Наталья Анатольевна, доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия)

Чулков Валерий Александрович, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры «Биомедицинская инженерия»

(Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Россия)

Редакционная коллегия:

Акинин Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»

(Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия)

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

Базарнова Юлия Генриховна, доктор технических наук, профессор,

директор Высшей школы биотехнологии и пищевых технологий

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия)

Бакин Игорь Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессов и аппаратов

перерабатывающих производств» (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева г. Москва, Россия)

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

Салават), Институт нефтепереработки и нефтехимии, г. Салават, Россия)

Богданов Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Безопасность

жизнедеятельности» (Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия)

Бурахта Вера Алексеевна, доктор химических наук, профессор

(Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан)

Васильев Андрей Витальевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела инженерной экологии и

экологического мониторинга Самарского научного центра РАН, заведующий кафедрой «Химическая технология и промышленная экология» (Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия)

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

Громов Юрий Юрьевич, доктор технических наук, профессор, директор института 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*)

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ SQL-СКРИПТОВ В LMS НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА Босенко Тимур Муртазович.....	9
К ВОПРОСУ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ИНТЕРНЕТ-МЕССЕНДЖЕРА Шестов Руслан Владимирович, Владимиров Константин Григорьевич, Милихина Ксения Михайловна.....	18
ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ КОЛМОГорова-АРНОЛЬДА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ Майоров Александр Олегович.....	28
АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫМ ВЫТЯЖНЫМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ Шварцбург Леонид Эфраимович, Кулизаде Дмитрий Игорьевич, Родькин Сергей Валерьевич.....	36
ИНТЕГРАТИВНЫЙ АНАЛИЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ И ФОРМАЛЬНЫХ ГРАФОВ ЗНАНИЙ Маркин Евгений Игорьевич, Зупарова Валентина Владимировна, Панфилова Марина Ивановна.....	40

ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНКАПСУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНГРЕДИЕНТА НА ОСНОВЕ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ Гурда Мария Дмитриевна, Яковченко Наталья Владимировна.....	52
ИЗУЧЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ИНГРЕДИЕНТАМИ Осипенко Елена Юрьевна, Денисович Юлия Юрьевна, Кичигина Екатерина Юрьевна.....	58
ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ Лось Михаил Александрович, Куракин Михаил Сергеевич, Давыденко Наталия Ивановна, Люц Вероника Андреевна.....	68
БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ БЕЛКОВОГО ПОРОШКА ИЗ РЫБНЫХ ОТХОДОВ: ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ Есепенок Константин Викторович, Горбачева Мария Владимировна, Шагаева Наталья Николаевна, Земцова Людмила Константиновна.....	79
ВЛИЯНИЕ НЕМИКРОБНОЙ ФЕРМЕНТАЦИИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА <i>ALLIUM SATIVUM L.</i> Банщикова Елена Евгеньевна, Школьников Марина Николаевна, Рожнов Евгений Дмитриевич, Волочко Милана Владимировна.....	86
ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТА ИЗ СЛИВОК ПОВЫШЕННОЙ ЖИРНОСТИ Голуб Ольга Валентиновна, Мотовилова Наталья Владимировна, Лобачева Елена Михайловна, Мотовилов Олег Константинович, Давыденко Наталия Ивановна.....	92
ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ АКТИВАЦИИ СУХИХ ДРОЖЖЕЙ ПРИ СБРАЖИВАНИИ ЯБЛОЧНОГО СОКА Белокурова Елена Сергеевна, Панкина Илона Анатольевна.....	100

ПОТЕРИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ХРАНЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В СВЕТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АПК Аббазова Венера Нагимовна.....	106
ВЛИЯНИЕ АНТИОКСИДАНТНОГО ПОТЕНЦИАЛА СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ НА СОХРАННОСТЬ УРБЕЧЕЙ Тимакова Роза Темерьяновна, Корчемкина Елена Юрьевна.....	113
ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КЛЕТОК НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СТАТИЧНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ ДРОЖЖЕЙ (<i>SACCHAROMYCES CEREVISIAE</i>) ПО БИОМАССЕ Кузьмин Антон Алексеевич.....	120
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	
ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА Танклевский Леонид Тимофеевич, Таранцев Александр Алексеевич, Балабанов Иван Дмитриевич, Алешков Александр Михайлович, Бондар Александр Иванович.....	129
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАБИНЕ ТРАКТОРА К-701МЗ ПОСЛЕ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА Гайда Анна Станиславовна, Егорова Ирина Викторовна.....	136
ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ Борисова Анастасия Викторовна, Баланова Марина Васильевна, Козлюк Виталий Викторович, Фирсов Виктор Анатольевич.....	141
ОЦЕНКА РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОНТЕ-КАРЛО Смирнова Елена Эдуардовна, Азаров Валерий Николаевич.....	147
ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ АВТОСТОЯНОК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ Малышева Екатерина Михайловна, Насырова Элина Сагитовна, Болегенова Салтанат Алихановна.....	157
РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ТРУДА ВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА Дементьева Юлия Васильевна, Косякин Виталий Сергеевич, Татаринцев Святослав Дмитриевич.....	165
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЗАПЫЛЕННОСТЬ ВОЗДУХА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ Ильяшенко Игорь Сергеевич, Коршунов Геннадий Иванович, Ковшов Станислав Вячеславович.....	170
ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ Манаева Алина Рамзиловна, Морозов Николай Николаевич, Шарифуллина Лилия Ринатовна.....	180
СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ Закирова Альфия Резавановна.....	186
СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ Смирнова Елена Эдуардовна.....	191
К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА Семейкин Александр Юрьевич, Климова Елена Владимировна, Носатова Елена Анатольевна, Петрова Виктория Александровна.....	200

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА:
ТЕКУЩИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Зиятдинова Сюмбель Фанилевна, Хайруллина Ляйсан Исмагиловна,
Богач Виталий Васильевич, Виноградов Василий Юрьевич.....210

УЗЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ ДЛЯ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Таранцева Клара Рустемовна, Тразанов Александр Викторович.....219

**СВЯЗЬ ПОДВИЖНОСТИ НЕРВНЫХ ПРОЦЕССОВ И УТОМЛЯЕМОСТИ
ВО ВРЕМЯ УБОРКИ УРОЖАЯ НА КОМБАЙНЕ «ЕНИСЕЙ КЗС 950»**

Лысенко Сергей Григорьевич, Гайда Анна Станиславовна,
Егорова Ирина Викторовна, Щепкин Александр Алексеевич.....226

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЫЛЕЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ В ТОЧЕЧНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ**

Манжилевская Светлана Евгеньевна, Азаров Валерий Николаевич.....232

CONTENT
INFORMATION SCIENCE, COMPUTING DEVICES AND CONTROLLING

DEVELOPMENT OF A MODULE FOR AUTOMATED CHECKING OF SQL SCRIPTS IN LMS BASED ON INTELLIGENT ANALYSIS	
Bosenko Timur Murtazovich.....	9
ON THE ISSUE OF DEPLOYMENT AND INTEGRATION OF REMOTE CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON THE INTERNET MESSENGER	
Shestov Ruslan Vladimirovich, Vladimirov Konstantin Grigoryevich, Milikhina Ksenia Mikhailovna.....	18
APPLICATIONS OF KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORKS FOR REMOTE PHOTOPLETHYSMOGRAPHY	
Mayorov Alexander Olegovich.....	28
ALGORITHM OF AUTOMATED CONTROL OF LOCAL EXHAUST UNIT FOR PRODUCTION EQUIPMENT	
Shvartsburg Leonid Efraimovich, Kulizade Dmitry Igorevich, Rodkin Sergey Valerievich.....	36
INTEGRATIVE ANALYSIS OF MULTIMODAL EDUCATIONAL DATA BASED ON NEURAL NETWORK MODELS AND FORMAL KNOWLEDGE GRAPHS	
Markin Evgeny Igorevich, Zuparova Valentina Vladimirovna, Panfilova Marina Ivanovna.....	40

FOOD TECHNOLOGY

APPLICATION OF ENCAPSULATION METHODS TO OBTAIN A FUNCTIONAL INGREDIENT BASED ON ESSENTIAL OILS	
Gurda Maria Dmitrievna, Iakovchenko Natalia Vladimirovna.....	52
STUDY OF CONSUMER PROPERTIES OF SUGAR COOKIES WITH FUNCTIONAL INGREDIENTS	
Osipenko Elena Yuryevna, Denisovich Yulia Yuryevna, Kichigina Ekaterina Yuryevna.....	58
PRACTICAL JUSTIFICATION FOR DESIGNING THE STRUCTURE OF THE FOOD DATABASE	
Los Mikhail Aleksandrovich, Kurakin Mikhail Sergeevich, Davydenko Nataliia Ivanovna, Lutz Veronika Andreevna.....	68
BIOLOGICAL VALUE OF PROTEIN POWDER FROM FISH WASTE: ADVANTAGES OF USE	
Esepenok Konstantin Viktorovich, Gorbacheva Mariya Vladimirovna, Shagaeva Natalya Nikolaevna, Zemtsova Lyudmila Konstantinovna.....	79
INFLUENCE OF NON-MICROBIAL FERMENTATION ON THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF <i>ALLIUM SATIVUM</i> L.	
Banshchikova Elena Evgenievna, Shkolnikova Marina Nikolaevna, Rozhnov Evgeniy Dmitrievich, Volochko Milana Vladimirovna.....	86
OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR OBTAINING A PRODUCT FROM HIGH-FAT CREAM	
Golub Olga Valentinovna, Motovilova Natalya Vladimirovna, Lobacheva Elena Mikhailovna, Motovilov Oleg Konstantinovich, Davydenko Nataliia Ivanovna.....	92
OPTIMIZATION CONDITIONS FOR ACTIVATION OF DRY YEAST DURING APPLE JUICE FERMENTATION	
Belokurova Elena Sergeevna, Pankina Ilona Anatolyevna.....	100
LOSSES IN PRODUCTION AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS IN LIGHT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX	
Abbazova Venera Nagimovna.....	106
THE EFFECT OF THE ANTIOXIDANT POTENTIAL OF RAW MATERIALS ON THE SAFETY OF CANDLES	
Timakova Roza Temer'janovna, Korchemkina Elena Yurievna.....	113
EFFECT OF INITIAL CELLS' CONCENTRATION ON THE PRODUCTIVITY OF BAKER'S YEAST BY BIO-MASS DURING BATCH CULTIVATION WITHOUT AGITATION	
Kuzmin Anton Alekseevich.....	120

TECHNOSPHERE SAFETY

APPLIED ISSUES OF MODELING FIRE PROTECTION SYSTEMS USING MARKOV CHAINS Tanklevsky Leonid Timofeevich, Tarantsev Alexander Alekseevich, Balabanov Ivan Dmitrievich, Aleshkov Alexander Mikhailovich, Bondar Alexander Ivanovich.....	129
COMPARATIVE ANALYSIS OF NOISE CHARACTERISTICS IN THE CABIN OF THE K-701-MZ TRACTOR AFTER MAJOR REPAIRS Gayda Anna Stanislavovna, Egorova Irina Viktorovna.....	136
DIGITAL TRANSFORMATION OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH MANAGEMENT SYSTEM: MODERN APPROACHES AND DEVELOPMENT PROSPECTS Borisova Anastasia Viktorovna, Balanova Marina Vasilyevna, Kozlyuk Vitaly Viktorovich, Firsov Viktor Anatolyevich.....	141
ASSESSING THE ENVIRONMENTAL IMPACT RISK IN CONSTRUCTION USING MONTE CARLO SIMULATION Smirnova Elena Eduardovna, Azarov Valery Nikolaevich.....	147
ASSESSMENT OF FIRE HAZARD OF PARKING LOTS OF DIFFERENT TYPES Malysheva Ekaterina Mikhailovna, Nasyrova Elina Sagitovna, Bolegenova Saltanat Alikhanovna.....	157
RISK ORIENTED FORECASTING IN ORGANIZING SAFE WORK FOR DRIVERS OF RAILWAY TRANSPORT ENTERPRISES Dementieva Yulia Vasilievna, Kosyakin Vitaly Sergeevich, Tatarintsev Svyatoslav Dmitrievich.....	165
STATISTICAL CORRELATION METHODS FOR ASSESSING THE IMPACT OF CLIMATIC VARIABLES ON AIR DUSTINESS IN OPEN-PIT MINES Iliashenko Igor Sergeevich, Korshunov Gennadiy Ivanovich, Kovshov Stanislav Vyacheslavovich.....	170
HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC PROTECTION OF PIPELINES AS A METHOD OF INCREASING FIRE SAFETY DURING TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS Manaeva Alina Ramzilevna, Morozov Nikolay Nikolaevich, Sharifullina Liliya Rinatovna.....	180
PROTECTION SYSTEM FOR ELECTRICAL PERSONNEL UNDER EXPOSURE TO ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS Zakirova Alfiya Rezavanovna.....	186
STATISTICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA: STUDY OF THE INFLUENCE OF MULTICOMPONENT CEMENTS COMPOSITION ON ENVIRONMENTAL INDICATORS Smirnova Elena Eduardovna.....	191
ON THE ISSUE OF CHOOSING THE OPTIMAL ASSESSMENT METHOD OCCUPATIONAL RISK Semeykin Alexander Yuryevich, Klimova Elena Vladimirovna, Nosatova Elena Anatolyevna, Petrova Victoria Alexandrovna.....	200
COMPUTER VISION IN THE FIELD OF INDUSTRIAL SAFETY: CURRENT PROBLEMS AND PROSPECTS Ziyatdinova Syumbel Fanilevna, Khairullina Laysan Ismagilovna, Bogach Vitaly Vasilyevich, Vinogradov Vasily Yuryevich.....	210
CORROSION RATE MEASUREMENT UNIT FOR IN-PIPE DIAGNOSTICS Tarantseva Klara Rustemovna, Trazanov Aleksandr Viktorovich.....	219
THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MOBILITY OF NERVOUS PROCESSES AND FATIGUE DURING HARVESTING ON THE COMBINE "YENISEI KZS 950" Lysenko Sergey Grigorievich, Gayda Anna Stanislavovna, Egorova Irina Viktorovna, Shchepkin Alexander Alekseevich.....	226
THE USE OF DUST SCREENS IN POINT-BASED BUILDINGS TO IMPROVE THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF URBAN AREAS Manzhilevskaya Svetlana Evgenievna, Azarov Valeriy Nikolaevich.....	232

УДК 004.891:378.146

EDN: NXGEBX

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ SQL-СКРИПТОВ В LMS НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7117-2458

AuthorID: 988509

ORCID: 0000-0002-5375-096X

ResearcherID: AAC-8046-2021

ScopusID: 57211992163

БОСЕНКО Тимур Муртазович, кандидат технических наук,

доцент департамента информатики, управления и технологий

Московский городской педагогический университет

(129594, Россия, Москва, ул. Шереметьевская, 28, e-mail: bosenkotm@mgpu.ru)

Аннотация. В статье представлена разработка модуля автоматизированной проверки SQL-скриптов для системы управления обучением (LMS) на основе применения больших языковых моделей (LLM) *CodeS* и *Llama 3.1* в сочетании с методами интеллектуальной обработки данных (*TAG*-метод и *RAG*-метод). Разработанный модуль реализует интеллектуальный механизм адаптивного выбора языковых моделей в зависимости от типа задач: *CodeS+TAG* для синтаксического и семантического анализа SQL-скриптов и *Llama+RAG* для анализа текстовых описаний и контекстной валидации решений. Предложен алгоритм организации информационного взаимодействия, интегрирующий технологии анализа структуры данных и извлечения релевантных примеров. Экспериментальное исследование, проведенное на базе двух образовательных учреждений с участием 385 обучающихся различных уровней подготовки (СПО, бакалавриат, магистратура), продемонстрировало существенное повышение эффективности проверки: точность анализа SQL-кода с помощью *CodeS+TAG* достигла 90.2-93.5%, а точность валидации текстовых описаний с помощью *Llama+RAG* составила 87-90% (против 82-85% в традиционных системах), время обработки сократилось до 155-195 мс, что значительно повысило производительность системы. Интеграция разработанного модуля в LMS позволила создать адаптивную систему проверки SQL-заданий, обеспечивающую комплексный анализ решений и предоставление персонализированной обратной связи обучающимся.

Ключевые слова: SQL-скрипты, большие языковые модели, LMS, LLM, интеллектуальный анализ, адаптивный механизм проверки.

DEVELOPMENT OF A MODULE FOR AUTOMATED CHECKING OF SQL SCRIPTS IN LMS BASED ON INTELLIGENT ANALYSIS

© The Author(s) 2025

BOSENKO Timur Murtazovich, candidate of technical sciences,

associate professor of the department of informatics, management and technology

Moscow City Pedagogical University

(129594, Russia, Moscow, Sheremet'yevskaya st., 28, e-mail: bosenkotm@mgpu.ru)

Abstract. The article presents the development of a module for automated checking of SQL scripts for a learning management system (LMS) based on the use of large language models (LLM) *CodeS* and *Llama 3.1* in combination with methods of intelligent data processing (*TAG* method and *RAG* method). The developed module implements an intelligent mechanism for adaptive selection of language models depending on the type of tasks: *CodeS + TAG* for syntactic and semantic analysis of SQL scripts and *Llama + RAG* for analysis of text descriptions and contextual validation of solutions. An algorithm for organizing information interaction is proposed, integrating technologies for analyzing data structure and extracting relevant examples. An experimental study conducted at two educational institutions involving 385 students of various levels of training (secondary, bachelor's, master's) demonstrated a significant increase in the efficiency of verification: the accuracy of SQL code analysis using *CodeS+TAG* reached 90.2-93.5%, and the accuracy of text description validation using *Llama+RAG* was 87-90% (versus 82-85% in traditional systems), the processing time was reduced to 155-195 ms, which significantly increased the system's performance. Integration of the developed module into the LMS made it possible to create an adaptive system for checking SQL tasks, providing a comprehensive analysis of solutions and providing personalized feedback to students.

Keywords: SQL scripts, large language models, LMS, LLM, intelligent analysis, adaptive verification engine.

Для цитирования: Босенко Т.М. Разработка модуля автоматизированной проверки SQL-скриптов в LMS на основе интеллектуального анализа / Т.М. Босенко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 9-17. – EDN: NXGEBX.

Введение. В условиях современной цифровизации образования автоматизированная проверка SQL-скриптов в системах управления обучением (LMS) становится критически важным компонентом подготовки специалистов по базам данных [1, 2]. Разработка специализированных модулей верификации SQL-скриптов направлена на решение ключевых образовательных задач: повышение эффективности практического освоения языка SQL, оптимизацию процесса оценивания навыков работы с базами данных и обеспечение масштабируемости обучения реляционным СУБД [3, 4]. Основной проблемой является отсутствие эффективных автоматизированных средств проверки SQL-скриптов, сочетающих масштабируемость и качество обратной связи. Решение этой проблемы позволит не только автоматизировать процесс проверки, но и обеспечить персонализированную обратную связь, сопоставимую с результатами экспертной оценки [5, 6].

Анализ последних исследований и публикаций демонстрирует множество подходов к решению проблемы автоматизированной проверки SQL-скриптов. Традиционные методы ручной проверки, несмотря на высокое качество обратной связи, требуют значительных временных затрат преподавателей и не масштабируются на большие потоки обучающихся [7]. В области обучения основам работы с базами данных и SQL особую актуальность приобретает вопрос эффективной проверки практических заданий студентов. В настоящее время применяются следующие основные методы проверки SQL-скриптов:

1. Методы ручной проверки, где преподаватель самостоятельно анализирует SQL-скрипты. Данный подход обеспечивает качественную обратную связь, включающую детальный анализ синтаксических конструкций, оптимальности запросов и соответствия требованиям нормализации баз данных. Однако существенным недостатком является высокая трудоемкость процесса, которая значительно возрастает при увеличении сложности схемы базы данных и при работе с большими группами обучающихся. Особые сложности возникают при проверке SQL-скриптов в специфических предметных областях, таких как продуктовая или операционная аналитика данных, где требуется формирование сложных вложенных запросов, включающих подзапросы, представления, оконные функции и другие специализированные SQL-скрипты в системах распределенного хранения гетерогенных данных [8].

2. Методы автоматизированной проверки, которые подразделяются на:

- методы на основе конвейерного подхода [9], использующие различные методологии выполнения и анализа запросов (CI/CD, изолированные среды тестирования, например, *Job Engine* [10]). Такие решения успешно решают проблему масштабируемости, обеспечивая автоматическое выполнение студенческих решений на предварительно

skonfigurirovannykh testovykh bazakh dannykh, no ustupaют в качестве обратной связи;

- методы с элементами искусственного интеллекта [11], включая применение больших языковых моделей (LLM) [12] и технологий *text-to-SQL* [13]. Данный подход позволяет не только верифицировать синтаксическую корректность запросов, но и оценивать их семантическую эквивалентность, стиль написания и оптимальность, обеспечивая более персонализированную обратную связь;

- методы гибридного типа, которые сочетают автоматическую проверку с возможностью преподавательской корректировки результатов, что позволяет объединить преимущества автоматизации и экспертной оценки.

Системы автоматизированной проверки, несмотря на их разнообразие, сопряжены с рядом общих ограничений:

- необходимость существенных вычислительных ресурсов [14];

- сложность первоначальной настройки и поддержки системы;

- ограниченная информативность обратной связи, часто сводящаяся к базовым логам выполнения запросов;

- потенциальные ошибки в семантическом анализе при использовании LLM-моделей.

Проведенный анализ показывает, что среди открытых LMS-решений (*Moodle, Chamilo, Open edX, Sakai, Canvas*) наиболее функциональным для обучения SQL является Moodle, благодаря широкому набору инструментов для создания тестов и курсов, а также интеграции с различными внешними сервисами и плагинами, которые позволяют эффективно обучать SQL. Благодаря расширению *Code-Runner*, эта платформа обеспечивает возможность автоматической проверки SQL-скриптов на основе predefinedных схем баз данных (SDB) или таблиц баз данных (TDB). Однако существующая реализация ограничивается лишь верификацией корректности результатов выполнения запросов, что затрудняет процесс обучения и отладки решений студентами [15].

Актуальность исследования заключается в необходимости разработки инновационных подходов к автоматизированной проверке SQL-скриптов в рамках LMS. Современные образовательные практики требуют эффективных инструментов для оценки знаний студентов, особенно в таких дисциплинах, где требуется написание специализированных SQL-скриптов на основе анализа баз данных. В связи с этим, интеграция больших языковых моделей в LMS представляет собой актуальное направление, поскольку эти модели, обученные на больших объемах текстовых данных, способны генерировать, анализировать и комментировать SQL-скрипт с высокой степенью точности и адаптивности.

Целью исследования является разработка модуля автоматизированной проверки SQL-скриптов в LMS на основе применения больших языковых

моделей и методов контекстного анализа для повышения эффективности оценки решений обучающихся и качества предоставляемой обратной связи. Экспериментальная база исследования представлена решениями *SQL*-задач, полученными от 385 обучающихся различных уровней подготовки (СПО, бакалавриат, магистратура) из двух вузов, что обеспечивает репрезентативность результатов для различных типов *SQL*-запросов и образовательных контекстов.

Методология. Методология исследования основана на интеграции языковых моделей в *LMS* и включает следующие ключевые аспекты:

1. Теоретическое обоснование. Внедрение *LLM* в систему *LMS* направлено на улучшение взаимодействия обучающегося с автоматизированной системой проверки заданий за счет возможности *LLM* понимать, анализировать и объяснять *SQL*-скрипты. Целью разработки является интеграция языковых моделей *CodeS* [16] и *Llama 3.1* [17, 18] в сочетании с методами интеллектуального анализа:

TAG (*Text Annotation Generator* – метод аннотации текста) [19] и *RAG* (*Retrieval-Augmented Generation* – метод генерации с извлечением контекста) [20] в *LMS* для создания адаптивного механизма проверки *SQL*-скриптов. Данный подход обеспечивает не только автоматизацию процесса проверки, но и персонализированную обратную связь на основе анализа решения обучающегося с учетом структуры базы данных и специфики *SQL*-запросов.

2. Экспериментальная база исследования. Экспериментальное исследование проводилось на базе двух образовательных учреждений: Московского городского педагогического университета (МГПУ) и МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение двух учебных годов: 2023-2024 и 2024-2025. В исследовании приняли участие студенты различных уровней подготовки: среднего профессионального образования, бакалавриата и магистратуры.

Распределение участников эксперимента по образовательным программам представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение участников эксперимента по образовательным программам

Учебное заведение	Направление подготовки	Образовательная программа	2023-2024	2024-2025	Всего
МГПУ	38.03.05 Бизнес-информатика	Аналитика данных и эффективное управление	80	90	170
МГПУ	38.04.05 Бизнес-информатика	Бизнес-аналитика и большие данные	25	30	55
МГПУ	44.04.01 Педагогическое образование	Интернет вещей в образовании	15	15	30
МГПУ	44.04.01 Педагогическое образование	Методика обучения информатике: программирование и большие данные	10	10	20
МГТУ им. Н.Э. Баумана	09.02.07 Информационные системы и программирование	Администратор баз данных. Программист	50	60	110

Общее количество участников эксперимента составило 385 человек, распределенных по различным уровням образования: 110 обучающихся по программе среднего профессионального образования, 170 студентов бакалавриата и 105 магистрантов. Такое разнообразие образовательных программ и уровней подготовки позволяет всесторонне оценить эффективность разработанного метода в различных образовательных контекстах.

3. Этапы разработки системы. Разработка системы реализована в два основных этапа:

3.1. Создание базовой инфраструктуры *LMS*. Базовая инфраструктура включает следующие компоненты:

- Локальная система контроля версий *Gogs* [21]:
 - Хранение и версионирование *SQL*-скриптов обучающихся.
 - Взаимодействие с распределенными хранилищами данных.
 - Организация процесса тестирования.
- *JOBE* сервер:
 - Безопасное выполнение тестов в изолированной среде *Docker*.
 - Проверка *SQL*-скриптов на соответствие тестовым сценариям.
 - Верификация результатов выполнения в базе

данных.

– *RESTful API* [22]:

- Координация взаимодействия между компонентами системы.
- Маршрутизация запросов к соответствующим хранилищам данных.

• Обработка результатов тестирования.

3.2. Интеграция языковых моделей и методов контекстного анализа.

Языковые модели:

– *CodeS*:

- Версии: 12B, 6B, 3B.
- Применение: анализ структуры *SQL*-запросов и синтаксическая проверка.

• Взаимодействие с *RDB* сервером для заданий типа «*CodeRunner*» и «вычисляемых вопросов».

– *Llama 3.1*:

- Версии: 70B, 32B, 8B.
- Применение: семантический анализ и контекстная обработка.

• Взаимодействие с *HadoopDW* для «закрытых вопросов» и «вопросов на соответствие».

Критерии выбора моделей:

- Размер контекстного окна (8K-128K токенов).
- Время отклика (до 200 мс).
- Точность анализа (не менее 85-90%).

– Возможность дообучения на специализированных наборах SQL-запросов.

Общая схема взаимодействия компонентов системы представлена на рисунке 1, где:

– *Gogs* обеспечивает сохранение и управление SQL-скриптами;

– *JOB Engine* выполняет проверку и тестирование скриптов.

– *RDB* сервер хранит схемы данных и связи для заданий типа «CodeRunner» и «вычисляемых вопросов».

– *HadoopDW* содержит данные для заданий «закрытых вопросов» и «вопросов на соответствие».

Такая структура обеспечивает четкое разделение ответственности между компонентами системы и эффективное управление процессом проверки различных типов SQL-заданий.

4. Механизм выбора и применения моделей. Выбор языковой модели определяется спецификой задания

и требованиями к анализу ответов. Для различных типов заданий применяются следующие комбинации моделей:

4.1. Для заданий типа «CodeRunner» и «вычисляемых вопросов», требующих анализа структуры базы данных и проверки SQL-скриптов, используется комбинация *CodeS* и *TAG*. Она обеспечивает:

– синтаксический анализ кода;

– семантическую проверку с учетом структуры БД.

4.2. Для «закрытых вопросов» и «вопросов на соответствие» применяется связка *Llama 3.1* и *RAG*, которая обеспечивает:

– эффективную работу с текстовыми описаниями;

– извлечение релевантных примеров.

Реализация данного подхода осуществляется через алгоритм автоматизированной проверки, который учитывает специфику каждого типа заданий и особенности применяемых языковых моделей.

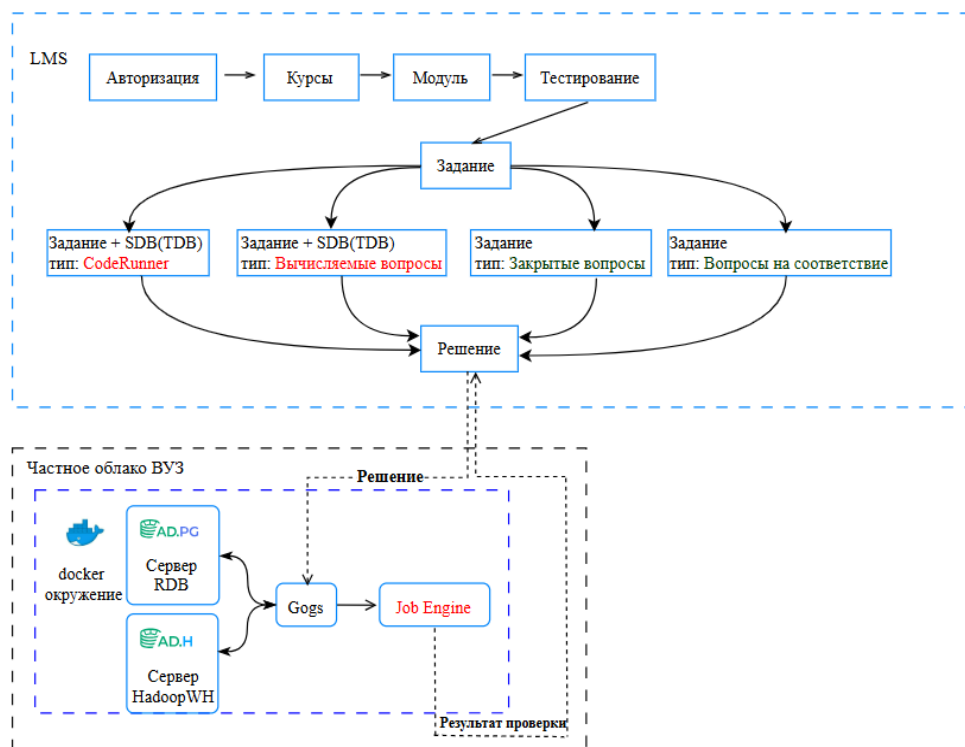


Рисунок 1 – Архитектура LMS системы с автоматизированной системой проверки SQL-скрипта обучающихся

Основные преимущества такого подхода:

– Адаптивность к различным типам заданий.
– Комплексный анализ ответов обучающихся.
– Возможность масштабирования системы проверки.

– Повышение качества обратной связи за счет специализации моделей.

Ниже представлен алгоритм, реализующий данный подход:

Требования:

– *C* (анализатор SQL-скрипта);
– *T* (анализатор типа задания);
– *M* (селектор модели проверки).

1 Ввод: t задание с типом и условиями, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ (SQL скрипты и структура базы данных)

2 Вывод: r (результат проверки задания с обратной связью)

3 Инициализация:

4 Определение типа задания: $\text{тип_задания} = T(t)$

5 Выбор модели: $\text{model} = M(\text{тип_задания})$

6 Обработка *CodeS+TAG* (если $\text{model} = [\text{CodeS} + \text{TAG}]$):

7 Проверка структуры БД $//(SDB \text{ или } TBD)$

8 Синтаксический анализ

9 Инициализация пустого словаря оценки синтаксиса = []

```

10 For each скрипт si in S do
11     оценка = C проверяет синтаксис si
12     оценки_синтаксиса.append(оценка)
13 end For
14 Семантический анализ: результат_семантики
= CodeS.анализ(s, оценки_синтаксиса)
15 Оптимизация SQL
16 Обработка Llama+RAG (если model == [Llama+RAG]):
17 Поиск контекста context = RAG.поиск(t)
18 Оценка релевантности: trust_context = RAG.
оценка(context) // оценка релевантности [0..1]
19 Расширенный поиск (при необходимости)
20 if trust_context < порог then // порог доверия к
найденному контексту (trust_context < 0.85)
21     расширенный_context = RAG.расширенный_
поиск(t) // поиск с учетом семантической // близости,
актуальности и предметной области
22     context = context + расширенный_context
23 end if
24 Генерация ответа: answer = Llama.генерация(t,
context)
25 r = Результат(answer, context)

```

5. Реализация интеграции языковых моделей.

На основе представленного алгоритма реализована интеграция языковых моделей в обновленную архитектуру LMS системы. Выбор модели и метода анализа определяется типом задания:

5.1. Для заданий типа «CodeRunner» и «Вычисляемые вопросы»:

- Используется связка CodeS+TAG для анализа SQL-скриптов;
- Осуществляется обращение к распределенному хранилищу данных:

- Метаданные таблиц – сервер HadoopDW (экосистема сервисов для хранения, обработки и анализа больших объемов данных на основе Arenadata Hadoop 3).

- Схемы данных и связи – сервер RDB (массивно-параллельная реляционная аналитическая СУБД на основе PostgreSQL).

5.2. Для остальных типов заданий:

- Применяется связка Llama+RAG.
- Извлечение релевантных примеров из хранилища HadoopDW.

5.3. Процесс обработки в общеуниверситетском кластере (рис. 2):

Получение ответа от JOB Engine:

- Результат проверки корректности SQL-скрипта.
- Метрики производительности.

Сбор комплексной информации обработчиком:

- Данные учебного модуля и задания.
- Решение обучающегося.
- Результаты тестирования.
- Структура БД (RDB сервер).
- Релевантные примеры (HadoopDW сервер).

Обработка языковыми моделями:

- CodeS+TAG: задания «CodeRunner» и «Вычисляемые вопросы».
- Llama+RAG: «Закрытые вопросы» и «Вопросы

на соответствие».

Формирование результата:

- Структурированный анализ решения.
- Выявленные ошибки.
- Рекомендации по улучшению.

Передача результата обучающемуся через LMS.

6. Характеристики используемых языковых моделей. В системе используются модели CodeS и Llama, характеристики которых представлены в таблице 2.

6.1. Особенности CodeS. CodeS является семейством открытых языковых моделей, разработанных международной группой исследователей из Института искусственного интеллекта AIRI и компании JetBrains Research. Модели CodeS, доступные в версиях 3B, 6B и 12B параметров, специально оптимизированы для работы с программным кодом, скриптами и техническими текстами. Особенностью данного семейства моделей является эффективное контекстное окно (32K токенов для CodeS-12B, 16K для CodeS-6B и 8K для CodeS-3B), что позволяет анализировать объемные фрагменты кода и сопутствующей документации.

6.2. Особенности Llama 3.1. Llama 3.1 представляет собой новейшую версию открытой языковой модели, разработанную компанией Meta AI Research. Семейство моделей Llama 3.1, включающее версии с 8B, 32B и 70B параметров, отличается улучшенной архитектурой с расширенным контекстным окном до 128K токенов и оптимизированным токенизатором. Модели Llama 3.1 продемонстрировали значительный прогресс в задачах обработки естественного языка и программного кода по сравнению с предыдущими версиями, что подтверждается результатами бенчмарков на различных наборах данных. Важной особенностью Llama 3.1 является улучшенная возможность дообучения (fine-tuning) на специализированных датасетах, что делает её особенно привлекательной для академических исследований.

Для моделей Llama указаны характеристики версии Llama 3.1 (Meta AI, 2024). Для каждой модели указана версия, оптимальная для конкретного типа задач согласно результатам тестирования производительности.

6.2. Особенности Llama 3.1. Llama 3.1 представляет собой новейшую версию открытой языковой модели, разработанную компанией Meta AI Research. Семейство моделей Llama 3.1, включающее версии с 8B, 32B и 70B параметров, отличается улучшенной архитектурой с расширенным контекстным окном до 128K токенов и оптимизированным токенизатором. Модели Llama 3.1 продемонстрировали значительный прогресс в задачах обработки естественного языка и программного кода по сравнению с предыдущими версиями, что подтверждается результатами бенчмарков на различных наборах данных. Важной особенностью Llama 3.1 является улучшенная возможность дообучения (fine-tuning) на специализированных датасетах, что делает её особенно привлекательной для академических исследований.

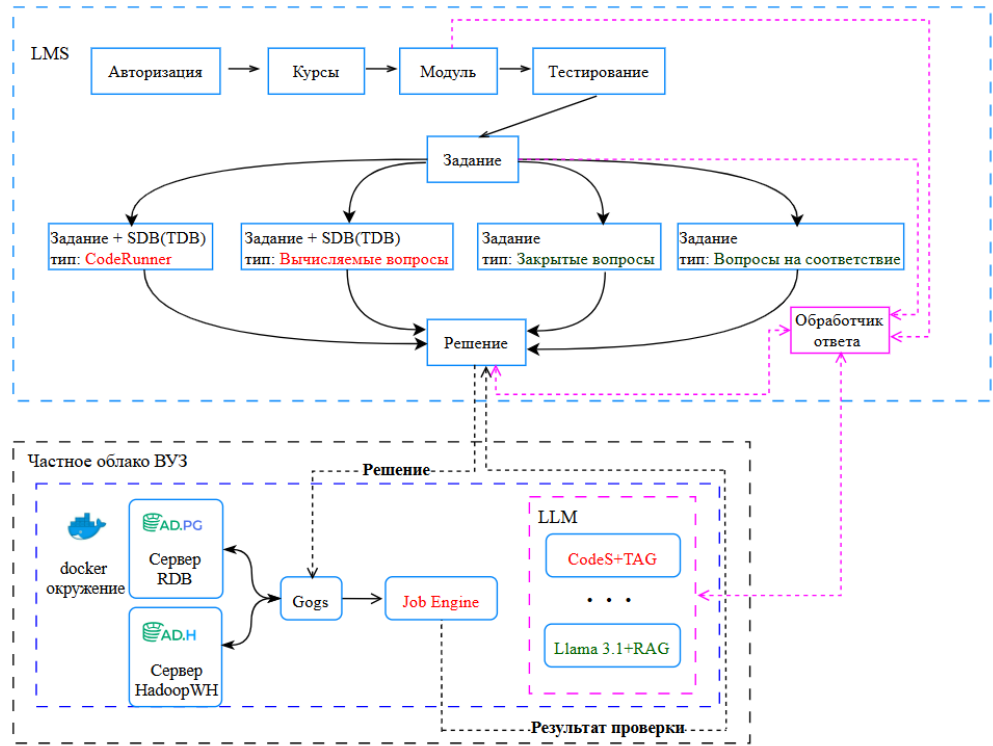


Рисунок 2 – Архитектура LMS системы с автоматизированной системы проверки скрипта обучающегося и интеграцией LLM + TAG для работы со структурой БД; LLM + RAG для извлечение релевантных примеров

Таблица 2 – Характеристики языковых моделей

Название LLM	Размер модели (параметры)	Размер контекстного окна (токены)	Возможность дообучения (fine-tune)	Доступность
CodeS-12B	12B	32K	Да	Academic License, Open Source
CodeS-6B	6B	16K	Да	Academic License, Open Source
CodeS-3B	3B	8K	Да	Academic License, Open Source
Llama 3.1 70B	70B	128K	Да	Academic License, бесплатно для исследований
Llama 3.1 32B	32B	128K	Да	Academic License, бесплатно для исследований
Llama 3.1 8B	8B	128K	Да	Academic License, бесплатно для исследований

Результаты. Оценка эффективности языковых моделей. В рамках проведенного исследования разработан и внедрен модуль автоматизированной проверки SQL-скриптов в LMS, основанный на применении больших языковых моделей и методов контекстного анализа. Созданный интеллектуальный механизм проверки кода интегрирует технологии TAG для работы со структурой баз данных и RAG для извлечения релевантных примеров, что позволяет обеспечить комплексный анализ решений обучающихся, что подтверждается данными таблицы 3.

Анализ данных таблицы 3 показывает, что модель CodeS демонстрирует стабильно более высокую производительность: скорость обработки составляет 155-175 мс против 175-195 мс у Llama 3.1 для всех категорий задач при сохранении более высокой точности анализа (91.8-93.2% против 89.5-91.4%). Использовались версии CodeS-12B и Llama 3.1-70B как наиболее производительные для указанных задач.

Анализ адаптивного механизма. Анализ эффективности адаптивного механизма показал значительные улучшения в качестве проверки SQL-заданий

различного уровня сложности.

Таблица 3 – Матрица соответствия типов задач и больших языковых моделей*

Категория задач	Модель	Точность анализа (%)	Среднее время обработки (мс)
Анализ SQL-запросов	CodeS	92.5	165
	Llama 3.1	90.2	185
Проверка синтаксиса	CodeS	91.8	155
	Llama 3.1	89.5	175
Оптимизация запросов	CodeS	93.2	170
	Llama 3.1	91.4	190
Генерация объяснений	CodeS	92.7	175
	Llama 3.1	90.8	195
Валидация структуры БД	CodeS	91.9	160
	Llama 3.1	89.7	180

* – Представленные метрики отражают разные аспекты анализа: для CodeS – непосредственную работу с SQL-скриптом, для Llama 3.1 – анализ текстовых описаний и объяснений.

Как видно из таблицы 4, адаптивный выбор моделей обеспечивает оптимальную точность анализа для различных типов задач:

– Для анализа *SQL*-скриптов с простым *JOIN* (≤ 2 таблиц) модель *CodeS* + *TAG* показывает точность 89%.

– При анализе текстовых описаний сложных многотабличных запросов (> 2 таблиц *JOIN*) *Llama 3.1* + *RAG* обеспечивает точность 87%.

– В задачах проверки простых условий фильтрации (≤ 3 условий *WHERE*) *CodeS* + *TAG* достигает точности 91%.

– При валидации текстовых объяснений сложной агрегации данных (> 2 функции) *Llama 3.1* + *RAG* демонстрирует точность 88%.

Такая дифференциация моделей особенно

эффективна при работе с различными образовательно-программными базами: базовые запросы для уровня СПО обрабатываются преимущественно связкой *CodeS* + *TAG*, в то время как сложные аналитические запросы на уровне бакалавриата и магистратуры успешно анализируются с помощью *Llama 3.1* + *TAG/RAG*.

Детальный анализ эффективности моделей в определении некорректных запросов. Проведенная апробация позволила получить детальную оценку эффективности моделей в определении некорректно составленных *SQL*-запросов и предоставлении рекомендаций (табл. 5) для обучающихся.

Таблица 4 – Эффективность адаптивного выбора версий моделей по критериям сложности *SQL*-запросов

Критерий	Пороговое значение	Модель	Точность анализа (%)	Оптимальность выбора задачи
Сложность <i>SQL</i> -запроса (количество <i>JOIN</i>)	≤ 2 таблицы <i>JOIN</i>	<i>CodeS</i> + <i>TAG</i>	89	Простые запросы к связанным таблицам
Сложность <i>SQL</i> -запроса (количество <i>JOIN</i>)	> 2 таблицы <i>JOIN</i>	<i>Llama 3.1</i> + <i>TAG</i>	87	Сложные многотабличные запросы
Вложенность подзапросов	≤ 2 уровня	<i>CodeS</i> + <i>TAG</i>	90	Запросы с простой вложенностью
Вложенность подзапросов	> 2 уровня	<i>Llama 3.1</i> + <i>TAG</i>	88	Запросы со сложной вложенностью
Количество условий в <i>WHERE</i>	≤ 3 условия	<i>CodeS</i> + <i>RAG</i>	91	Простые условия фильтрации
Количество условий в <i>WHERE</i>	> 3 условия	<i>Llama 3.1</i> + <i>RAG</i>	89	Сложные условия фильтрации
Использование агрегатных функций	≤ 2 функции	<i>CodeS</i> + <i>RAG</i>	90	Базовая агрегация данных
Использование агрегатных функций	> 2 функции	<i>Llama 3.1</i> + <i>RAG</i>	88	Сложная агрегация с группировкой

Таблица 5 – Сравнительный анализ эффективности моделей в определении некорректно составленных *SQL*-запросов и предоставлении рекомендаций (в %)

Тип <i>SQL</i> -запроса и ошибки	<i>CodeS</i> + <i>TAG</i> (% верных рекомендаций)	<i>Llama 3.1</i> + <i>RAG</i> (% верных рекомендаций)
Метод анализа	Синтаксический, семантический анализ <i>SQL</i> -скрипта	Анализ естественного языка, контекстная валидация
<i>JOIN</i> (≤ 2 таблицы)		
Неверные условия соединения	89	87**
Отсутствие ключевых связей	87	85**
Некорректная структура	88	86**
<i>JOIN</i> (> 2, но не более 5)		
Сложные многотабличные связи	87	87**
Избыточные соединения	85	89**
Проблемы оптимизации	82***	-
Подзапросы (≤ 2 уровня)		
Некорректная вложенность	90	88**
Ошибки в структуре	89	87**
Логические несоответствия	88	89**
Подзапросы (> 2, но не более 3)		
Сложная вложенность	88	88**
Проблемы оптимизации	81***	-
Избыточность подзапросов	86	87**
<i>WHERE</i> (≤ 3 условия)		
Логические ошибки	91	89**
Некорректные операторы	90	88**
Ошибки в условиях	89	87**
<i>WHERE</i> (> 3, но не более 5)		
Сложные условия	89	89**
Избыточные фильтры	88	90**
Проблемы оптимизации	83***	-
Агрегатные функции (≤ 2)		
Неверная группировка	90	88**
Ошибки в вычислениях	89	87**
Некорректные функции	88	86**
Агрегатные функции (> 2)		
Сложные вычисления	88	88**
Проблемы оптимизации	82***	89**
Избыточная агрегация	86	88**

** – оценка корректности на основе текстового описания решения, предоставленного обучающимся, где LLM предоставляет пояснение.

*** – низкие показатели связаны с ограниченным корпусом данных *CodeS* + *TAG* для задач оптимизации, который обновляется только раз в год.

Оптимизация системных ресурсов. Внедрение адаптивного механизма выбора моделей привело к существенной оптимизации использования вычислительных ресурсов (табл. 6).

Достигнутые улучшения связаны с эффективным распределением задач между моделями:

CodeS + TAG применяется для синтаксического и семантического анализа *SQL*-скриптов, *Llama 3.1 + RAG* используется для анализа текстовых описаний и контекстной валидации решений, что обеспечивает оптимальное соотношение производительности и потребления ресурсов.

В результате нагрузка на процессор снизилась с 85% до 65%, уменьшилось потребление *RAM* с 24 GB до 18 GB. Использование специализированных моделей для конкретных типов задач позволило сократить среднее время отклика системы с 2.5 до 1.9 секунд, что напрямую повлияло на увеличение пропускной способности с 50 до 62 запросов в минуту.

Эти улучшения особенно важны для образовательных и производственных сценариев, где требуется высокая скорость обработки и минимальные задержки при проверке *SQL*-заданий.

Таблица 6 – Оптимизация ресурсов при использовании адаптивного механизма

Параметр	До внедрения	После внедрения
CPU utilization	85%	65%
RAM usage	24 GB	18 GB
Время отклика	2.5 с	1.9 с
Пропускная способность	50 зап/мин	62 зап/мин

Обсуждение. Разработанный модуль автоматизированной проверки *SQL*-скриптов в *LMS* демонстрирует значительный прогресс в применении больших языковых моделей и методов контекстного анализа. Основные преимущества разработанного решения:

Повышение точности и скорости анализа:

– Точность анализа: 89.5-93.2% (против 82-85% в традиционных системах).

– Время обработки: 155-195 мс (против 3-4 секунд в стандартных *LMS*).

Адаптивный подход к проверке:

В отличие от существующих *LMS*-решений, использующих унифицированный подход, разработанный модуль применяет дифференцированную стратегию:

– *CodeS + TAG*: оптимизирован для анализа структуры *SQL*-запросов, достигая точности до 93.2% при времени обработки 155-175 мс.

– *Llama 3.1 + RAG*: эффективен для семантического и контекстного анализа с точностью до 91.4% при времени обработки 175-195 мс.

Образовательный контекст. Модуль показал различную эффективность для разных уровней образования:

– СПО: оптимальное использование *CodeS + TAG* для анализа базовых *SQL*-запросов, за счет большего

количества отведенного времени на практические занятия.

– Бакалавриат и магистратура: эффективное применение *Llama 3.1 + RAG* для валидации описаний сложных аналитических решений.

Особенности и различия моделей. *CodeS + TAG* специализируется на прямом анализе *SQL*-кода, обеспечивая детальную проверку синтаксиса, семантики и оптимизации запросов. Модель способна предоставлять конкретные рекомендации по исправлению и улучшению *SQL*-скриптов. Точность определения ошибок достигает 90-91% для базовых конструкций, но снижается до 81-83% для задач оптимизации из-за ограниченного корпуса данных.

Llama 3.1 + RAG фокусируется исключительно на анализе текстовых ответов студентов на предварительно заданные вопросы. Модель не анализирует *SQL*-код напрямую, а оценивает правильность и полноту текстовых объяснений студентов. При этом точность достигает 88-90 для задач оптимизации благодаря большому объему обучающих данных по описанию проблем производительности.

Анализ проблем и ограничений. Различие в подходах к формированию наборов данных приводит к принципиально разным способностям анализа. *CodeS + TAG* с ручным созданием наборов данных для тонкой настройки обеспечивает комплексный анализ *SQL*-скрипта. *Llama 3.1 + RAG* с использованием открытых данных имеет больший объем, но менее специализированных данных, что особенно критично при малой доле (5%) программного кода в наборе данных для тонкой настройки [23]. Ежегодное обновление корпуса обратной связи позволяет постепенно улучшать качество рекомендаций обеих моделей, но не решает фундаментальных ограничений исходной архитектуры наборов данных *Llama 3.1* в работе с *SQL*-скриптами.

Результаты апробации. Представленные результаты получены в ходе апробации моделей в течение 2023-2024 и 2024-2025 учебных годов. Однако комплексный анализ ошибок проводился только в 2024 году. Это связано с отсутствием настроенной системы автоматического переобучения для модели *CodeS + TAG* на обновленном наборе данных. Текущие ограничения ручного обновления корпуса данных являются одним из ключевых направлений дальнейшего развития модели.

Направления совершенствования. Ключевым направлением улучшения является разработка системы автоматического переобучения *CodeS + TAG*, которая позволит осуществлять непрерывный анализ новых типов ошибок, оперативно обновлять корпус данных в течение учебного года, улучшить показатели оптимизации запросов с текущих 81-83% и повысить адаптивность модели к новым паттернам ошибок студентов.

Выводы. Разработанный модуль автоматизированной проверки *SQL*-скриптов в *LMS*, реализующий интеграцию больших языковых моделей

(CodeS, Llama 3.1) и методов интеллектуального анализа (TAG-, RAG-метод), продемонстрировал высокую эффективность в исследовании. Применение разработанного метода адаптивного выбора моделей в совокупности с контекстным анализом позволило существенно улучшить показатели автоматизированной проверки: точность анализа SQL-кода с помощью CodeS + TAG достигла 90.2-93.5%, а точность валидации текстовых описаний с помощью Llama 3.1 + RAG составила 87-90%, что значительно превосходит показатели традиционных систем проверки.

Предложенный алгоритм организации информационного взаимодействия в модуле с интегрированными технологиями TAG и RAG обеспечил эффективную работу с различными типами SQL-запросов в LMS. Высокие показатели точности анализа достигнуты для всех категорий запросов: от простых до сложных многотабличных конструкций с вложенными подзапросами. Существенная оптимизация системных ресурсов позволила обеспечить стабильную работу системы при нагрузках, характерных для образовательного процесса.

Дальнейшее развитие системы сосредоточено на создании механизма автоматического переобучения модели CodeS + TAG для повышения эффективности анализа новых типов ошибок и оперативного обновления корпуса данных. Интеграция механизмов автоматического обновления корпуса в сочетании с расширением поддержки сложных типов SQL-запросов позволит создать более эффективную и адаптивную систему автоматизированной проверки SQL-заданий, отвечающую современным требованиям цифрового образования. Такой комплексный подход к развитию системы обеспечит качественный скачок в эффективности проверки SQL-заданий и предоставлении персонализированной обратной связи обучающимся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лавриненко И.Ю. Перспективы использования LMS в рамках современного высшего образования / И.Ю. Лавриненко // Научно-методический электронный журнал "Концепт". – 2023. – № 1. – С. 17-35. – DOI 10.24412/2304-120X-2023-11002. – EDN JBMUHS.
2. Taipalus T. SQL Education: A Systematic Mapping Study and Future Research Agenda / T. Taipalus, V. Seppänen // ACM Transactions on Computing Education. – 2020. – Vol. 20, № 3. – Article 20. – P. 1-33. – DOI 10.1145/3398377.
3. Ченгарь О.В. Разработка внешнего инструмента LMS Moodle для интеграции в учебный курс «базы данных» / О.В. Ченгарь, Е.Н. Мащенко // Естественные и технические науки. – 2023. – № 5(180). – С. 41-47. – EDN SOPNHN.
4. Ishaq M. Advances in database systems education: Methods, tools, curricula, and way forward / M. Ishaq [et al.]. – DOI: 10.1007/s10639-022-11293-0 // Education and Information Technologies. – 2023. – Vol. 28. – P. 2681-2725.
5. Жуков И.А. Система контроля знаний и практических навыков по программированию / И.А. Жуков, Ю.Л. Костюк // Информатика и образование. – 2023. – Т. 38, № 2. – С. 66-74. – DOI 10.32517/0234-0453-2023-38-2-66-74. – EDN RKGXU.
6. Гумберг Н.С. Программа сбора, хранения и анализа данных процессов тестирования обучающихся / Н.С. Гумберг // Перспективы науки. – 2024. – № 1(172). – С. 22-26. – EDN CZUVDI.

7. Искусственный интеллект в российском высшем образовании: текущее состояние и перспективы развития / С.Г. Давыдов, Н.Н. Матвеева, Н.В. Адемукова, А.А. Вичканова // Университетское управление: практика и анализ. – 2024. – Т. 28, № 3. – С. 32-44. – DOI 10.15826/umpra.2024.03.023. – EDN FELSP.

8. Данилов А.Д. Исполнение SQL-подобных запросов в распределенных гетерогенных системах на базе Apache Hadoop / А.Д. Данилов, М.О. Саввин, А.Е. Карачевцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 58-63. – DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.3.008. – EDN JFXUDU.

9. Никифоров, А.В. Как внедрение непрерывной интеграции и тестирования помогает обеспечить соответствие требованиям при разработке программного продукта / А.В. Никифоров // International Journal of Professional Science. – 2023. – № 4. – С. 88-96. – EDN JYKVO.

10. JOBE: A restful server for running code jobs under sandbox conditions: [репозиторий] / R. Lobb. URL: <https://github.com/trampgeek/job> (дата обращения: 02.06.2024).

11. Weber-Wulff, D., Anohina-Naumeca, A., Bjelobaba, S. и др. Testing of detection tools for AI-generated text. Int J Educ Integr. 2023. Т. 19, № 26. DOI: 10.1007/s40979-023-00146-z.

12. Назаров Д.М. Применение больших языковых моделей в образовательном процессе / Д.М. Назаров, С.В. Бегичева // Бизнес. Образование. Право. – 2024. – № 3(68). – С. 430-436. – DOI 10.25683/VOLBI.2024.68.1057. – EDN EGTWFW.

13. Gao D., Wang H., Li Y., Sun X., Qian Y., Ding B., Zhou J. Text-to-SQL empowered by large language models: A benchmark evaluation // arXiv preprint arXiv:2308.15363. – 2023. – Vol. 17, № 5. – P. 1132-1145. DOI: 10.14778/3641204.3641221.

14. Босенко Т.М. Анализ микросервисной архитектуры в среде e-learning с многовариантным доступом к учебным материалам / Т.М. Босенко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 10(148). – DOI 10.60797/IRJ.2024.148.65. – EDN HNMMP.

15. Лапко А.Н. Методологический инструментарий автоматизированной проверки правильности составления SQL-запросов / А.Н. Лапко, М.А. Куцакин, В.А. Дунаев, М.В. Чемодуров // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 4(82). – С. 97-101. – DOI 10.36622/VSTU.2020.13.30.022. – EDN OYXXBA.

16. Li H., Zhang J., Liu H., Fan J., Zhang X., Zhu J., Chen H. Codes: Towards building open-source language models for text-to-SQL // Proceedings of the ACM on Management of Data. – 2024. – Vol. 2, № 3. – P. 1-28. – DOI: 10.1145/3654930.

17. Touvron H., Martin L., Stone K., Albert P., Almahairi A., Babaei Y., et al. Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models // arXiv:2307.09288 [cs.CL]. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2307.09288.

18. Touvron H., Lavril T., Izacard G., Martinet X., Lachaux M.A., Lacroix T., Lample G. Llama: Open and efficient foundation language models // arXiv preprint arXiv:2302.13971. – 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2302.13971> (дата обращения: 12.10.2024).

19. Biswal A. et al. Text2SQL is not enough: Unifying ai and databases with tag // arXiv preprint arXiv:2408.14717. – 2024. – P. 1-10. – DOI 10.48550/arXiv.2408.14717.

20. Gao Y. et al. Retrieval-augmented generation for large language models: A survey // arXiv preprint arXiv:2312.10997. – 2023. – P. 1-21. – DOI 10.48550/arXiv.2312.10997.

21. Gogs: A painless self-hosted Git service: [сайт]. URL: <https://gogs.io/docs> (дата обращения: 02.06.2024).

22. Lobb R. Jobe: REST API Version 1.0 / R. Lobb. – Текст: электронный // GitHub: [сайт]. – 2015. – 17 March. – URL: <https://github.com/trampgeek/job/blob/master/restapi.pdf> (дата обращения: 02.06.2024).

23. Zhao W.X. A Survey of Large Language Models / W. X. Zhao [и др.] // arXiv.org: [сайт]. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2303.18223> (дата обращения: 14.11.2024).

Статья поступила в редакцию 04.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 62-519

EDN: NCLNWR

К ВОПРОСУ РАЗВЕРТЫВАНИЯ И ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ИНТЕРНЕТ-МЕССЕНДЖЕРА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8710-9567

AuthorID: 767645

ORCID: 0009-0005-5874-746X

ШЕСТОВ Руслан Владимирович, соискатель,

старший преподаватель кафедры «Информатика и системы управления»

Самарский государственный технический университет филиал в городе Сызрани

(446026, Россия, Сызрань, улица Советская, 122, e-mail: BimerM3@mail.ru)

ORCID: 0009-0002-3962-0875

ВЛАДИМИРОВ Константин Григорьевич, инженер

АО «Сызранский НПЗ»

(446026, Россия, Сызрань, улица Советская, 45, e-mail: konstantin.g.vl@yandex.ru)

ORCID: 0009-0006-1627-3582

МИЛИХИНА Ксения Михайловна, студентка кафедры «Информатика и системы управления»

Самарский государственный технический университет филиал в городе Сызрани

(446020, Россия, Сызрань, улица Гагарина, 28, e-mail: cjump6@gmail.com)

Аннотация. В данной статье предлагается один из методов развертывания дополнительного канала дистанционного контроля и регулирования, далее КДКиУ, интегрированного в состав программного обеспечения верхнего уровня системы управления модульной котельной установки. Такие установки получают все более широкое распространение на предприятиях топливно – энергетического комплекса и, в частности, используются на удаленных месторождениях. В условиях, когда технологические установки находятся на значительном удалении друг от друга эксплуатанты не всегда имеют в штате высококвалифицированный персонал, способный оперативно ее обслужить на месте, чаще приходится обеспечивать доставку специалистов на удаленные месторождения, где установка эксплуатируется, что сопряжено с временными и экономическими издержками. Целью проведенного исследования явилась оценка целесообразности интеграции дополнительного КДКиУ, который позволил бы одновременно удаленно контролировать и при необходимости изменять параметры работы технологического оборудования нескольких автоматизированных установок вне зависимости от нахождения на установке обслуживающего персонала, а также повысить скорость информирования служб ТОиР о возникновении отклонений в работе технологического оборудования с целью принятия возможных мер. Изыскания проводились на базе автоматизированной модульной котельной установки с аппаратным обеспечением фирмы «ОБЕИ» и системой диспетчерского управления на базе SCADA системы MASTER SCADA 4D. Обязательным условием при разработке программного обеспечения явилась простота его интеграции в состав эксплуатируемой системы регулирования. Были рассмотрены различные способы построения КДКиУ – использование существующих пакетных предложений на базе GSM/WEB – технологий, облачных систем и непосредственно разработка своего программного обеспечения. В результате проведенных исследований было разработано программное обеспечение позволившее одновременно удаленно управлять и контролировать ряд эксплуатационных параметров электромашиного оборудования нескольких удаленно расположенных технологических установок посредством использования мобильного устройства связи. К особенностям программного обеспечения следует отнести широкие функциональные возможности, наличие меток времени, возможность дистанционного визуального контроля выполнения поступивших команд и скорость передачи информации.

Ключевые слова: PYTHON, TELEGRAM, MASTER SCADA 4D, DEKOPATOP MESSAGE_HANDLER, OSCAT, ОБЕИ ПЛК 110, ОБЕИ ПЧВ, JSON.

ON THE ISSUE OF DEPLOYMENT AND INTEGRATION OF REMOTE CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON THE INTERNET MESSENGER

© The Author(s) 2025

SHESTOV Ruslan Vladimirovich, applicant,

senior lecturer of the Department of Computer Science and Control Systems

Samara State Technical University branch in Syzran

(122 Sovetskaya Street, Syzran, 446026, Russia, e-mail: BimerM3@mail.ru)

VLADIMIROV Konstantin Grigoryevich, engineer

JSC "Syzran Refinery"

(446026, Russia, Syzran, Sovetskaya Street, 45, e-mail: konstantin.g.vl@yandex.ru)

MILIKHINA Ksenia Mikhailovna, student of the Department of "Informatics and Control Systems"

Samara State Technical University branch in Syzran

(446020, Russia, Syzran, Gagarin Street, 28, e-mail: cjumpy6@gmail.com)

Abstract. This article proposes one of the methods for deploying an additional remote monitoring and control channel, hereinafter referred to as RMC&C, integrated into the upper-level software of the modular boiler plant control system. Such plants are becoming increasingly widespread at enterprises in the fuel and energy sector and, in particular, are used at remote fields. In conditions where process plants are located at a considerable distance from each other, operators do not always have highly qualified personnel on staff capable of promptly servicing them on site; it is often necessary to provide for the delivery of specialists to remote fields where the plant is operated, which is associated with time and economic costs. The purpose of the study was to assess the feasibility of integrating an additional RMC&C that would allow for simultaneous remote monitoring and, if necessary, changing the operating parameters of process equipment of several automated plants regardless of the presence of service personnel at the plant, as well as increasing the speed of informing maintenance and repair services about deviations in the operation of process equipment in order to take possible measures. The research was conducted on the basis of an automated modular boiler plant with hardware from OWEN and a dispatch control system based on the SCADA system MASTER SCADA 4D. A mandatory condition for the development of software was the simplicity of its integration into the operating control system. Various methods of building a control and monitoring system were considered - the use of existing package offers based on GSM / WEB technologies, cloud systems and directly the development of our own software. As a result of the research, software was developed that allowed simultaneous remote control and monitoring of a number of operational parameters of electrical machinery equipment of several remotely located process units using a mobile communication device. The features of the software include wide functionality, the presence of time marks, the ability to remotely visually monitor the execution of incoming commands and the speed of information transfer.

Keywords: PYTHON, TELEGRAM, MASTER SCADA 4D, MESSAGE_HANDLER DECORATOR, OS-CAT, ARIES PLC 110, ARIES PCHV, JSON.

Для цитирования: Шестов Р.В. К вопросу развертывания и интеграции систем удаленного контроля и управления на базе интернет-мессенджера / Р.В. Шестов, К.Г. Владимиров, К.М. Милихина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 18-27. – EDN: NCLNWR.

Введение. Причиной, побудившей авторов к разработке описываемого КДКиУ, явилась потребность одного из эксплуатантов автоматизированных модульных котельных установок (АМКУ) в уменьшении расходов на их администрирование и обслуживание. Решение этой потребности заказчик видел в сокращении количества обслуживающего персонала за счет использования системы диспетчерского контроля и управления (СДКиУ) с возможностью удаленного администрирования через Internet. По задумке эксплуатанта предполагалось, что при внедрении системы управления с такой архитектурой один оператор сможет обслуживать несколько АМКУ, расположенных на значительном удалении друг от друга. Фактически развертывание дополнительного КДКиУ позволяло «отвязать» оператора от стационарного диспетчерского пункта, но при этом сохранить для него возможность оперативного внесения изменений в технологический процесс при возникновении такой необходимости в любое время суток и из любой точки земного шара, где есть доступ в Internet. Отмеченная особенность способствовала практической реализации задачи удаленного администрирования СДКиУ нескольких АМКУ при помощи одного смартфона. Учитывая вероятные сложности, которые могли возникнуть, как при развертывании КДКиУ, так и при его интеграции в состав используемой СДКиУ было принято решение первоначально разработать канал, который бы позволил реализовать задачи удаленного контроля и управления исключительно насосным оборудованием машинного зала одной из АМКУ. Такой подход

позволил практически отработать предлагаемую технологию, оценить правильность принятых мер и целесообразность их внедрения. Дальнейшее масштабирование разработанного КДКиУ на остальные АМКУ не вызывает значительных затруднений вследствие идентичности комплектов систем управления АМКУ.

Методология. В этом разделе хотелось бы осветить вопросы, касающиеся возможных подходов к развертыванию КДКиУ. Анализ предлагаемых промышленностью решений, позволил сформировать следующие возможные подходы к разработке:

- использование облачных систем;
- использование специального аппаратного обеспечения для передачи информации по GSM каналам;
- использование web-технологий;
- разработка своего программного обеспечения.

Каждый из рассматриваемых методов имел как свои достоинства, так и недостатки. Казалось бы, что наиболее рациональным подходом для решения поставленной эксплуатантом задачи является использование облачных систем, таких как OwenCloud [6] или DISP SKY [7]. К достоинствам облачных систем следовало отнести то, что они достаточно широко представлены на рынке, могут быть легко интегрированы в существующую систему управления АМКУ и лишены затруднений с технической поддержкой при их эксплуатации. К недостаткам рассмотренных облачных систем, по мнению авторов, следует отнести то, что, во-первых, они платные, во-вторых, при их эксплуатации могут наблюдаться некоторые затруднения, связанные с

потерей связи, а кроме того для их развертывания и уверенной эксплуатации производитель рекомендует использовать дополнительное аппаратное обеспечение – сетевые шлюзы, например, для связи с *OwenCloud* производитель рекомендует использовать шлюз ПМ210 – GSM (2G).

Несмотря на отмеченные недостатки облачных систем в инициативном порядке коллективом авторов все же были проведены исследовательские работы, в ходе которых осуществлялись попытки подключения к обеим облачным системам, когда ПК, на базе которого работала система диспетчерского управления был использован в качестве сервера для связи УУ с облачными сервисами. Упомянем, также, что при подключении к *DISP SKY* использовался OPC-сервер *MasterOPC Universal Modbus Server* фирмы ИНСАТ. Подробные рекомендации, касающиеся подключения к *OwenCloud* и *DISP SKY* широко представлены в открытых источниках [6,7]. Подключение осуществлялось через мобильный *Internet* ПАО «МЕГАФОН» в дневное время суток, 4G – сеть. Результаты, полученные в ходе этих экспериментов, были продемонстрированы эксплуатанту, но не удовлетворили его в плане частоты обновления данных. Возможным решением этих проблем была бы активация тарификации, но заказчик работ с этим предложением не согласился.

Предложение, касающееся комплектования системы управления GSM/GPRS-модемом, *OBEH ПМ01*, также было отклонено заказчиком, так как объем передаваемой информации по GSM каналу достаточно небольшой. В принципе если задача заключалась бы исключительно в передаче предупреждений и аварийных сообщений, то этого канала было бы вполне достаточно, однако для решений более масштабных задач такая архитектура системы управления уже не подходила.

В связи с этим было принято решение разработать собственное программное обеспечение. Проработка этого вопроса позволила принять к рассмотрению две концепции, при которых контроль и управление насосными агрегатами могли бы осуществляться посредством:

- web-сервера, к которому оператор может обратиться через web-браузер;
- одного из популярных мессенджеров.

На первый взгляд использование web-сервера казалось более перспективным тем более, что входящее в состав АСУ программное обеспечение позволяло реализовать эту задачу без особых затруднений. В частности, первоначально предполагалось воспользоваться штатным *Internet*-клиентом SCADA системы, однако впоследствии выяснилось, что он лишен возможности управления, что являлось неприемлемым. Другой вариант подразумевал использование в качестве WEB-сервера самой *MasterSCADA 4D*, а связь с ней должна была реализовываться с использованием технологии OPC UA, но при такой реализации канала, для полноценного

взаимодействия с ним, использование смартфона было бы уже достаточно неудобным, а функционал самого канала избыточным. Кроме того, существовала вероятность, что эксплуатанту придется приобретать лицензию на использование специализированного программного обеспечения, а также не стоило забывать о длительности загрузки страницы, которая могла быть достаточно большой и зависимой от степени загрузки оборудования провайдера. Иные способы использования концепции с web-сервером – когда могла потребоваться разработка ПО, были более затратными как по времени, так и экономически. В результате получалось, что объем и стоимость работ при практической реализации концепции с использованием web-сервера оказывались не приемлемыми для заказчика – более целесообразным было бы использование готовых облачных технологий, но этот вариант по известным причинам заказчика также не устраивал. В этой связи была принята к рассмотрению вторая концепция, где предполагалось разработать программное обеспечение, которое позволило бы реализовать удаленный контроль и управление насосными агрегатами машинного зала модульной котельной посредством использования одного из распространенных на рынке мессенджеров.

Поиск решения для поставленной задачи подразумевал необходимость ознакомления с используемым на котельной установке программно-аппаратным комплексом. В ходе изучения этого комплекса было выявлено, что система управления насосным оборудованием подачи теплоносителя потребителям была разработана на базе аппаратного обеспечения фирмы *OBEH*. СДКиУ была реализован на базе SCADA-системы *MASTER SCADA 4D* фирмы ИНСАТ, исполнительный модуль *Free*.

В АМКУ эксплуатировалась группа из двух центробежных насосов, где один использовался в режиме основного, а второй в режиме резервного. Проектировщиками была предусмотрена программная возможность переключения режимов эксплуатации насосов с целью равномерного расходования ресурсов. Управление электромашинным оборудованием производилось за счет использования частотно регулируемого электропривода со скалярным управлением. Были предусмотрены контуры противоаварийной защиты (ПАЗ):

- от «сухого» хода центробежного насоса;
- от значительных колебаний давления в напорном трубопроводе.

Обмен информацией между управляемым преобразователем частоты (УПЧ) и устройством управления (УУ) реализован посредством протокола *ModBus RTU*. В качестве УУ используется программируемый логический контроллер *OBEH ПЛК 110*. Обмен информацией между УУ и АРМ развернутом на базе ПК реализован через протокол *ModBus TCP/IP*.

В ходе анализа программных кодов выяснилось, что СДКиУ не содержала программной составляющей, а представляла собой исключительно

интерфейс для взаимодействия оператора с АСУ – содержало мнемосхему процесса, отражала текущие параметры работы, позволяла задавать уставки технологических параметров, настраивать систему аварийного оповещения и т.д. Непосредственно само ПО – программы регулирования, смены режимов эксплуатации электродвигателей, ПАЗ, предупредительной сигнализации были реализованы на базе УУ. Последующий анализ этого ПО и технической документации аппаратных средств АСУ позволил установить, что для программирования УУ использовалась среда для программирования ПЛК *CodeSys V2.3*, а само ПО было разработано с использованием языков стандарта *IEC 61131/3 – FBD, LD и Techno ST*.

Разрабатываемое программное обеспечение создавалось в два этапа. На первом этапе потребовалось проработать процесс обмена информацией между УУ и преобразователем частоты. Для решения этой задачи была использована специализированная библиотека *ОВЕН ПЛК_ПЧВ_v2.lib 26.7.19* [2]. С целью упрощения чтения программного кода сторонними разработчиками для его написания был использован язык функциональных блоков *FBD*. Нелишним здесь будет уточнение, что описываемая библиотека была разработана для работы непосредственно с преобразователями частоты фирмы *ОВЕН*, что не позволяет ее использовать для работы с приборами иных производителей. В состав описываемой библиотеки входит четыре основных *FBD* блока – *com_word_fb*, *stat_word_fb*, *task_fb* и *value_fb*. Условно все эти блоки можно разделить на две группы – управляющие и информационные. К управляющим блокам относятся блоки *com_word_fb*, *task_fb*, а к информационным соответственно *stat_word_fb* и *value_fb*.

Управляющий блок *com_word_fb* главным образом предназначен для запуска/останова/реверсирования электромашиного агрегата и конфигурирования режима торможения, а блок *task_fb* для задания параметров выходной мощности – текущего значения выходной мощности, граничных значений допустимых частот, интенсивности торможения и др. Информационные блоки использовались исключительно для формирования сигналов обратных связей с целью их передачи на как на экран автоматизированного рабочего места оператора, так и через КДКиУ.

Фактически функциональные возможности АСУ в плане контроля/управления ИМ определялись блоками библиотеки *ПЛК_ПЧВ_v2.lib 26.7.19*. Отметим, что не все входы/выходы управляющих и контролируемых блоков были задействованы, в частности не использовались параметры, которые способствовали реализации дискретного изменения процента мощности использования ИМ, была отключена возможность указания иного источника задания за исключением интерфейса *RS-485* и исключена возможность реверсирования двигателя.

Входы управляющих *FBD* блоков *com_word_fb*, *task_fb* связывались с тегами СДКиУ, выходы с регистрами ИМ, входы информационных *FBD* блоков *stat_word_fb* и *value_fb* напротив связывались с регистрами ИМ, а выходы с тегами СДКиУ. Таким образом УУ являлось ведущим устройством для аппаратного обеспечения полевого уровня и подчиненным устройством для устройств, расположенных на верхнем уровне. Нелишним здесь будет упоминание, что в состав описываемой АСУ были включены реле давления с поддержкой унифицированного выходного сигнала, используемые в качестве датчиков обратных связей с целью защиты электромашиного оборудования от эксплуатации в режиме «сухого» хода.

В ходе разработки КДКиУ потребовалось решить вопрос, касающийся способа обмена информацией между пользователем и ИМ. Было очевидно, что в любом случае требуется разработать ПО, которое позволит связать ИМ с пользователем эксплуатирующим КДКиУ, но запросы/команды, указываемые этим пользователем, можно пересылать как через СДКиУ, так и непосредственно. Использование метода, при котором пользователь взаимодействует с ИМ через СДКиУ подразумевает работу с текстовым форматом обмена данными *JSON* или *XML*, а при непосредственном обмене информацией следует разработать скрипт, который позволит организовать обмен информацией между ПО КДКиУ с ИМ через протокол *ModBus*. Эксплуатанту был предложен вариант, при котором в КДКиУ будут учтены обе эти возможности, причем вариант управления непосредственно через протокол предполагалось реализовать в качестве резервного на случай отказа СДКиУ или возникновения проблем в ее работе, однако в процессе согласования эксплуатант принял решение отказаться от возможности управления ИМ через протокол и первоначально проработать вопросы, касающиеся использования формата *JSON* [3, 4].

Результаты. Прежде чем переходить к описанию программного обеспечения хотелось бы отдельно упомянуть причины побудившие использовать именно *TELEGRAM*. В принципе здесь все достаточно очевидно – этот мессенджер является наиболее распространенным в настоящее время, кроме того, в сети представлено огромное количество справочных материалов, касающихся создания ботов на его базе.

Организация процесса обмена информацией между верхним и средним уровнем системы управления подразумевала использования файлов *JSON* или *XML*. Применительно к рассматриваемой системе управления более удобным оказалось работать с файлом *JSON*, так как возможность работы с этими файлами поддерживается эксплуатируемой на установке *SCADA* системой *MASTER SCADA 4D*. Фактически этот файл используется для передачи команд поступающих/передаваемых от/к пользователя/пользователю.

Использование формата *JSON* указывает на необходимость работы с перечнем ключ/значение, где под понятием ключа подразумевается параметр управляемого преобразователя частоты, состояние которого будет изменяться пользователем КДКиУ, значение есть состояние ключа, которое указывает пользователь в процессе эксплуатации КДКиУ. Организация взаимодействия посредством формата *JSON* потребовала создания файла, который бы хранил перечень ключей и их начальных значений. В ходе работы над программным обеспечением параметры, с которыми предполагалось работать условно были разделены на три группы:

- управления и конфигурации;
- обратной связи;
- текущего состояния.

Параметры управления и конфигурации ИМ предназначены для пуска/останова электропривода, выбора режим останова, указания процентов требуемой мощности использования электродвигателя и использования постоянного тока при активации соответствующего режима торможения.

Параметры обратной связи позволяют оценить текущее состояние электропривода, в частности готовность электропривода к запуску, выбранный режим торможения, активацию/деактивацию автоматического режима управления, запуск электроп-

ривода и выход его на уставку.

Параметры текущего состояния используются с целью контроля напряжение электрической сети, питающей ИМ, значения как непосредственно самого тока подаваемого на ИМ, так и его частоты, а также мощности.

Согласно этим группам, были созданы три файла – управления и конфигурации, обратной связи и текущего состояния. В принципе потребность создание трех файлов вместо одного была вовсе не обязательной, основным фактором, повлиявшим в пользу этого решения, явилось желание упрощения процесса последующего написания и отладки ПО.

Значения ключей связывались с тегами СДКиУ, что позволяло производить их изменения как с экрана автоматизированного рабочего места оператора, так и посредством использования КДКиУ. Здесь основной сложностью явилась задача конвертации данных в строковый вид с целью их последующей передачи/получения ПО/от ПО КДКиУ. Эта задача была решена посредством использования штатных средств *SCADA*-системы *MASTER SCADA 4D* [4]. Результатом решения этой задачи явилась *FBD* диаграмма отображенная на рисунке 1, которая позволяла инвертировать массивы данных в строковый вид и соответственно строки в массивы с последующей записью/чтением в/из файла.

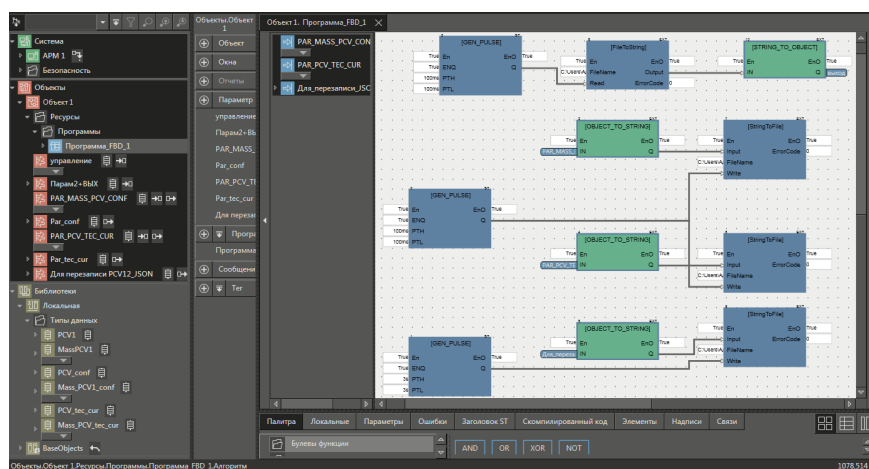


Рисунок 1 – *FBD*-диаграмма конвертации типов данных

Необходимость формирования тактов преобразования типов данных и чтения/записи этих данных в файлы, хранящие перечни пар ключ/значение, потребовала интеграции в описываемую *FBD*-диаграмму генераторов прямоугольных сигналов. Описание настройки *FBD* блоков, реализующих описываемые генераторы в рамках статьи, представляется не целесообразным, так как соответствующая информация представлен в справке *SCADA* системы *MASTER SCADA 4D*.

Не лишним будет упоминание о цели, которая преследовалась в ходе разработки диаграммы и послужила причиной использования генератора прямоугольного сигнала, формирующего импульсы

с большей задержкой чем остальные и использования 4, а не 3 групп параметров по количеству формируемых *json*-файлов.

Потребность в использовании этого блока и других связанных с ним блоков обусловлена необходимостью сохранения возможности управления ИМ из машинного зала. Дело в том, что при изменении параметров ИМ с СДКиУ необходимо переписать значения ключей *JSON* файла параметров настройки и конфигурирования. Отказ от этой возможности привел бы к тому, что при изменении параметров работы ИМ со стороны СДКиУ отобразить эти изменения через дополнительный канал дистанционного контроля и управления было бы

невозможным. В связи с этим со стороны СДКиУ потребовалось реализовать не только возможность чтения состояния ключей иерархии данных, соответствующего *JSON* файла, но и возможность их перезаписи. Именно этим обусловлена задача создания «лишней» группы параметров – она содержит данные о текущей конфигурации ИМ и служит обратной связью для файла настройки и конфигурации. Таким образом при разработке программной составляющей СДУ были разработаны 2 идентичных группы параметров – одна предназначена для задания и конфигурирования настроек ИМ, которые поступают из *json* файла управления и конфигурирования, а вторая используется для записи текущего состояния ИМ в этот файл. Изменения параметров ИМ в процессе работы оборудования СДУ не фиксируются, а значит требуется указание временного интервала, по истечении которого будут обновляться значения ключей файла управления и конфигурации, при этом систему следует настроить таким образом, чтобы частота чтения данных из *json* файла превышала частоту записи данных в этот файл. В противном случае изменение параметров работы ИМ не представляется возможным. В результате при использовании КДКиУ оператор перед внесением каких-либо изменений может проконтролировать не только параметры обратной связи и текущего состояния, но и данные, касающиеся текущей конфигурации.

Помимо конфигурирования процесса обмена информацией в СДКиУ с целью практического развертывания КДКиУ следовало разработать ПО, которое позволяло бы пользователю посредством

мессенджера *TELEGRAM* изменять/контролировать текущие параметры ИП АМКУ. Наименее затратным способом практической реализации этой задачи явилась разработка *TELEGRAM* бота, который предоставлял бы пользователю графический интерфейс с перечнем команд определяемых *FBD* блоками системы управления. Активация некоторой команды должна приводить либо к получению значения ключей, либо к модификации этих значений. Для написания *TELEGRAM* бота был использован высокоуровневый язык программирования *Python*. Причины, побудившие к использованию именно этого языка программирования достаточно тривиальны – существует большое количество бесплатных библиотек, в том числе и для работы с интересующим нас мессенджером, а также простота использования языка и наличие обширной базы справочных материалов.

Начальный этап разработки программного кода *TELEGRAM* бота подразумевал необходимость определения перечня параметров управления и контроля, которые будут доступны пользователю. В принципе этот перечень применительно к описываемой программе не велик и полностью определяется возможностями *FBD* блоков библиотеки *ОВЕН ПЛК_ПЧВ_v2.lib 26.7.19* и отображен в таблице 1.

Нелишним будет отметить, что существует возможность увеличения этого перечня при использовании процедуры обмена информацией через цифровой протокол, так как в этом случае есть возможность работы непосредственно со всеми регистрами управляемого преобразователя частоты.

Таблица 1 – Описание команд, используемых для управления *TELEGRAM* ботом

/Pusk	Используется для модификации значения ключа 'Start_stop' файла управления. Активация этой команды приводит к установке ключа в состояние TRUE и запуску электропривода
/stop	Используется для модификации значения ключа 'Start_stop' файла управления. Активация этой команды приводит к установке ключа в состояние FALSE и останову электропривода
/Torm	Используется для активации меню выбора режимов торможения
/read_JSONconf	Используется с целью получения информационных сведений от файла управления и конфигурации. Результатом работы команды является сообщение о текущей конфигурации электропривода. Работает со следующими ключами: 'SIStop', 'DC_stop', 'Start_stop', 'Chastota', 'IStopVal'.
/status	Используется для оценки текущего состояния электропривода. Данные о этом состоянии поступают из файла обратной связи. Результатом работы команды является сообщение с состоянием ключей: 'ready_eng', 'ready_drive', 'slow_stop_stat', 'task_stat', 'avt', 'work_stat'.
/cur_value	Используется для оценки текущих параметров мощности, напряжения, частоты тока и величине тока. Данные о значениях этих параметров поступают из файла текущего состояния.
/res_braking	Сброс режимов торможения
/AdditBotSettings	Активация меню дополнительных настроек
/Percent	Используется для указания процента требуемой мощности управляемого преобразователя частоты. Задается в процентах. Фактически определяют частоты тока, питающего электродвигатель. Указание значения в диапазоне 0...100% приводит к модификации 'Chastota' файла управления и конфигурации

Нелишним здесь будет более подробно остановиться на командах */Torm* и */AdditBotSettings*. Команда выбора режимов торможения позволяет активировать один из двух, предлагаемых производителем преобразователя частоты режимов:

– торможение с выбегом, когда электродвигатель

выключается, но присутствует инерционный выбег рабочего вала двигателя;

– торможение постоянным током.

При активации торможения с выбегом происходит изменения параметров ключей 'SIStop' и 'DC_stop' файла управления и конфигурации,

которым присваивается состояния *TRUE* и *FALSE* соответственно. Несколько сложнее обстоит дело с настройкой режима останова постоянным током. Здесь помимо изменения состояния параметра ключа *'SlStop'* и *'DC_stop'* на *FALSE* и *TRUE* соответственно, необходимо дополнительно указать процент мощности используемого тока торможения. Этот параметр *TELEGRAM* бот предлагает указать автоматически при включении режима останова постоянным током, путем отправки соответствующего сообщения. В ответе на полученное сообщение оператору необходимо указать числовое значение в диапазоне 0...100%. Указанное значение присваивается параметру ключа *'IStopVal'* файла управления и конфигурации. Не лишним будет упомянуть и о целесообразности использования команды сброса ранее установленных режимов торможения. Потребность в ее использовании обусловлена тем, что при активированном состоянии любого из существующих режимов торможения запуск электродвигателя невозможен. В этой связи и было принято решение дополнить *TELEGRAM* бот возможностью быстрой деактивации режимов торможения.

Команда */AdditBotSettings* позволяет перейти в меню дополнительных функций, где оператор может отправить лог-файл на требуемую электронную почту, перейти на сайт производителя аппаратного обеспечения или активировать процесс записи посредством использования *web* камеры. Потребность получения видеозаписи обусловлена желанием эксплуатанта иметь возможность визуального контроля процессов в машинном зале АМКУ. Здесь также следует упомянуть о лог-файле, в который прописываются информационные данные касающиеся использования разрабатываемого канала, в частности фиксируется само событие – поступившая команда, ошибка и т.д., а также дата и время, когда это событие произошло.

В инициативном порядке коллектив авторов добавил в разрабатываемое ПО возможность голосового оповещения поступивших команд и выпол-

ненных роботом действий. Необходимость описываемого дополнения вызвана стремлением оповестить персонал, в случае его нахождения в машинном зале модульной котельной о действиях, которые выполняет оператор дистанционно.

Таким образом практическая реализация описанных функциональных возможностей потребовала использования, в ходе разработки ПО, следующих библиотек:

- *telebot* – библиотека, которая была использована для создания *Telegram* бота;
- *json* – библиотека, предназначенная для работы с json файлами;
- *os* – модуль, который предоставляет широкие возможности по работе с операционной системой ПК. Именно этот модуль использовался в случаях, когда требовалось указать путь к директориям, в которых хранились json файлы, лог файл и видеозаписи процессов, происходящих в машинном зале модульной котельной;
- *smtplib* – модуль, который определяет сеанс клиента *SMTP* и используется для отправки электронной почты;
- *email* – библиотека для управления сообщениями электронной почты;
- *pyttsx3* – библиотека, которая позволяет преобразовать текст в речь;
- *cv2* – библиотека компьютерного зрения, предназначенная для анализа и обработки изображений;
- *time* – модуль для работы со временем.

Использование библиотеки *telebot* значительно упрощает процесс написания программного кода *Telegram* бота за счет использования декораторов, основным из которых является *message handler*. Этот декоратор обрабатывает все сообщения, которые поступают от пользователя.

Алгоритм работы *Telegram* бота проще проиллюстрировать на примере команды на запуск электропривода, которая поступает от пользователя КДКиУ.

```
134 @bot.message_handler(commands=['Pusk_eng'])
135 def start(message):
136     bot.send_message(message.chat.id, 'Вы задали команду на запуск привода', parse_mode='html')
137     # ... (комментарий) ...
138     teclineDate = time.localtime()
139     STteclineDate = time.strftime('%a/%d/%Y, %H:%M:%S', teclineDate)
140     # ... (комментарий) ...
141     SpaudioComm = 'Поступила команда на запуск электродвигателя'
142     SpasComm(SpaudioComm) Возвращаем поступившую команду
143     # ... (комментарий) ...
144     txtCom = ': поступила команда на запуск электродвигателя'
145     DateTime = STteclineDate
146     ChFormWriteLog = ''
147     IValWriteLog = ''
148     WriteLog(DateTime, txtCom, ChFormWriteLog, IValWriteLog)
149     # ... (комментарий) ...
150     # ... (комментарий) ...
151     # ... (комментарий) ...
152     # ... (комментарий) ...
153     # ... (комментарий) ...
154     # ... (комментарий) ...
155     # ... (комментарий) ...
156     # ... (комментарий) ...
157     # ... (комментарий) ...
158     # ... (комментарий) ...
159     # ... (комментарий) ...
160     # ... (комментарий) ...
161     # ... (комментарий) ...
162     # ... (комментарий) ...
163     # ... (комментарий) ...
164     # ... (комментарий) ...
```

Рисунок 2 – Иллюстрация программного кода реализующего запуск электродвигателя насосного агрегата машинного зала модульной котельной

После получения команды реализуется следующий алгоритм:

- фиксируется время и дата поступления обрабатываемой команды;
- осуществляется голосовое оповещение оператора о назначении этой команды и операциях, которые будут реализованы программой в ходе обработки поступившей команды;
- код команды, время и дата команды фиксируются в специальном лог-файле, хранящем историю взаимодействия пользователя с системой управления, как при использовании СДКиУ, так и при использовании КДКиУ;
- работа непосредственно с файлом, хранящим пары ключ/значение – открытие файла для чтения, преобразование строки в формате *JSON* в объект *Python* типа *dict* посредством использования функции *.loads* изменение или чтение значения ключа, перезапись файла;
- отправка ответного сообщения о выполнении команды.

Нелишним здесь будет привести комментарии касательно методов *send_message* и *register_next_step_handler* использованных при написании программного кода *Telegram* бота.

Метод *send_message* использовался совместно с объектом *message* из *Bot API*. Этот объект содержит информацию о сообщении. Его использование подразумевает необходимость указания идентификаторов *from_user.id* или *chat.id*. Использование идентификатора *chat.id* проиллюстрировано на рисунке 1, когда робот при получении команды на запуск электропривода отправляет пользователю в чат ответное сообщение о том, что он зафиксировал получение команды и запустил соответствующую функцию. Идентификатор *from_user.id* позволяет реализовать возможность получения ответа пользователя на отправленное ему сообщение. Например, этот идентификатор использовался совместно с методом *register_next_step_handler* в случае, когда пользователю было необходимо указать адрес электронной почты, на которую будет отправлен лог-файл.

Функция *AnsEmailAddrTo* присваивает переменной *emailAddrTo* текст, содержащийся в ответном сообщении от пользователя – адрес электронной почты, на которую будет отправлен лог и передает эту переменную функции *SendMailTo* после чего отправляет пользователю в ответном сообщении информацию об отправке лог файла на указанную им электронную почту и дублирует сообщение голосовым оповещением.

Не лишним будет привести описание процессов формирования лог-файла и его отправки на электронную почту. Для этого следует ознакомиться с функциями *WriteLog* и *SendMailTo*.

Процесс формирования лог-файла достаточно прост и подразумевает следующие этапы:

- создание пустого файла в одном из

распространенных текстовых редакторов;

- указание пути к директории, в которой хранится созданный файл;
- открытие этого файла на редактирование с возможностью дополнительной записи в него требуемого информационного сообщения;
- запись информационного сообщения;
- закрытие файла с сохранением изменений.

Анализ программных кодов, отображенных на рисунках 2 и 3, показывает, что в лог-файл могут записываться данные касающиеся:

- даты и времени события (переменная *DateTime*);
- текстового обозначения этого события (переменная *txtCom*);
- указываемые значения процентов мощности использования электропривода (переменная *ChForWriteLog*) и постоянного тока торможения (переменная *IValWriteLog*).

Текст сообщения, прописываемого в лог файл, определяется функцией, которая активирована, например при пуске электродвигателя в лог-файл будут записаны данные о дате/времени события и текстовое обозначение этого события, остальные данные будут проигнорированы. Этого удалось добиться за счет присваивания переменным, передаваемым функции *WriteLog* необходимых значений.

Настройка процесса отправки сообщения на электронную почту с прикрепленным к этому сообщению лог-файлом оказалась несколько сложнее. Согласно требованиям заказчика исследования, необходимо было обеспечить возможность работы исключительно с электронной почтой *mail.ru*.

С этой целью потребовалось настроить возможность доступа к почте посредством внешнего приложения, что подразумевало использование дополнительного пароля. Сам пароль генерировался автоматически, но мог изменяться по желанию пользователя. Программный код функции *SendMailTo*, используемой для отправки электронного сообщения с прикрепленным лог файлом отображен на рисунке 2.

Использование функции *SendMailTo* подразумевает передачу ей нескольких переменных, в частности:

- *emailAddrTo*, которая содержит адрес получателя электронного письма;
- *SubjMail*, содержит тему отправляемого сообщения;
- *TextMail* непосредственно текст отправляемого сообщения.

Присваивание значений этим переменным осуществляется внутри тела функции, которая будет вызывать функцию *SendMailTo*, в нашем случае такой функцией является *AnsEmailAddrTo*.

Помимо указанных переменных необходимо внутри функции *SendMailTo* следует указать настройки *SMTP* сервера. Не лишним будет упомянуть, что в зависимости от используемого почтового клиента настройки *SMTP* сервера могут меняться,

в связи с чем, при реализации возможности работы с различными почтовыми клиентами необходимо реализовать возможность автоматического изменения этих настроек в зависимости от адреса электронной почты, которую указывает пользователь. Дополнение робота такой возможностью в принципе не сложно и требует написания программного кода, который будет работать со строками – искать совпадения символов между ключевым словом и словами в полученном адресе. В этом случае в качестве ключевого слова рекомендуется использовать строки, *mail.ru*, *yandex.ru*, *gmail.com* и т.п.

Также при изучении программного кода, отображенного на рисунке 5, может возникнуть вопрос, касающийся назначения функции *attach_file*. Эта функция реализует задачу прикрепления к отправляемому электронному письму сформированного лог файла.

Процесс формирования видеозаписи подразумевает использование библиотеки *cv2*, суть использования которой применительно к решаемой задаче заключается в захвате кадра формируемого *web* камерой и сохранения этого кадра в файл с указанным расширением.

Процесс разработки программного кода для реализации этой задачи условно можно разделить на два этапа – настройка параметров формируемой видеозаписи и непосредственно процесс ее формирования. На рисунке 2 представлен программный код, который реализует непосредственно первый этап.

Из анализа программного кода первого этапа очевидно, что формируемый видеофайл имеет размер 640x480 пикселей, формат *MP4*, называется '*PCV*' и формируется со скоростью 20 кадров в секунду. При формировании видеозаписи рекомендуется указать скорость формирования видеофайла такую же как скорость формирования кадров видеокамерой. Второй этап формирования видеофайла подразумевает работу уже непосредственно с данными, поступающими с *web* камеры.

Здесь происходит захват данных, поступающих с *web* камеры и их запись в файл. С целью захвата данных, поступающих с камеры, необходимо указать ее индекс. Уточним, что при работе с устройствами, имеющими встроенную *web* камеру, операционная система присваивает этой встроенной камере по умолчанию индекс 0 при подключении дополнительных камер индекс инкрементируется.

Далее, с целью формирования видеофайла был организован цикл, в ходе которого захватываемые кадры записывались в файл '*PCV.mp4*'. Цикл работал только в том случае если происходил захват кадра. При отсутствии захвата выводилось системное сообщение об ошибке. Очевидно, что размер видеофайла не может быть бесконечным. Для его ограничения было использовано два метода – выход из цикла при нажатии на клавиатуре кнопки *ESC* и по истечении 10 секунд записи. При условии формирования 20

кадров в секунду за 10 секунд формируется 200 кадров. Наступление описываемых событий приводит к выходу из цикла формирования видеофайла и отправке сформированного видеофайла оператору.

В результате исследований был разработан дополнительный КДКиУ, интегрированный в состав эксплуатируемой СДКиУ, который позволил практически реализовать задачи удаленного контроля и управления *ИМ АМКУ* с использованием смартфона. Достоинством описываемого КДКиУ является простота и доступность его реализации так как не требуется дополнительного программного и аппаратного оборудования, что снижает экономические издержки на разработку. Описываемый КДКиУ может без больших затруднений масштабироваться на несколько однотипных технологических объектов при идентичности используемых на этих объектах систем управления. Целевой областью использования КДКиУ являются автоматизированные модульные технологические объекты, эксплуатируемые в местностях, где существуют возможность использования мобильного интернета достаточного для работы мессенджера *TELEGRAM*. Отметим, что коллективом авторов была предусмотрена возможность развертывания непосредственного обмена информацией между *TELEGRAM* ботом и ИМ без использования СДКиУ, что указывает на возможность развертывания резервного канала контроля/управления при возникновении затруднений в работе СДКиУ.

Обсуждение. В результате проведенного исследования было разработано программное обеспечение, интегрированное в уже используемую систему управления модульной котельной установки. Описываемое программное обеспечение позволило реализовать задачи повышения оперативности реагирования служб ТОиР и снизить нагрузку на обслуживающий персонал. Наличие меток времени при ведении электронного журнала позволило дистанционно оценивать возможные причины неисправности и вероятные затраты на восстановление или ремонт оборудования. Очевидно, что на рынке уже существуют специальные программные продукты, которые позволяют решать аналогичные задачи, но стоимость этих продуктов достаточно велика, а функционал зачастую избыточен для небольших технологических объектов. Предлагаемый КДКиУ может быть интегрирован в практически любую систему управления, которая работает с файлами *JSON* или *XML*, что позволяет реализовать обмен информацией практически с любой *SCADA* системой. Нелишним здесь будет уточнение, что коллективом авторов также предусмотрена возможность непосредственного обмена информацией с ИМ посредством протокола *MODBUS*. Уточним, что в настоящее время коллектив авторов продолжает развитие этой темы, в частности формируется база данных с перечнем устройств и их регистровой архитектурой, которая позволит упростить процесс

развертывания промышленной сети. Нелишним здесь будет упомянуть, что использование описываемого ПО не ограничивается только модульными котельными, в сферу возможного применения входят также различные путевые подогреватели, установки подготовки нефти к транспортировке подогреватели топливного газа и иные модульные устройства, работающие в автоматическом режиме и эксплуатируемые на удаленных месторождениях, где есть возможность выхода в интернет. Возможность оценки состояния и управления ИМ через мессенджер позволяет легко подключить любого пользователя. Отметим, что разработчиками была учтена возможность разделения прав, то есть в зависимости от типа пользователя меняется перечень функциональных возможностей бота.

Выводы. Внедрение мобильных сетей пятого поколения с высокими скоростями передачи информации способствует расширению спектра областей, в которых может использоваться описываемая технология. Основное затруднение для ее дальнейшего продвижения сопряжено с вопросом временных задержек в передаче информации в сети мобильного оператора или иного провайдера, предоставляющего доступ в Internet. В ходе дальнейших исследований предлагается детально рассмотреть этот вопрос и проанализировать возможные способы минимизации этих задержек, что позволит определить круг возможных к применению на текущий момент времени областей промышленности и народного хозяйства, где допустимо коммерческое использование систем аналогичных описанной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Владимирова К.Г., Шестов Р.В. К вопросу развертывания дополнительных каналов контроля и управления технологическими процессами на базе современных средств интернет-коммуникации // Молодежная наука: вызовы и перспективы: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции / Отв. редактор О.В. Карсунцева – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2023. – С. 332-338.
2. Библиотека CDS2.3 3.5 для работы с ПЧВ: [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/product/preobrazovatel_chastoti_oven_pchv1_i_pchv2/primer_raboti.
3. Введение в JSON: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.json.org/json-ru.html>.
4. Юрий Горелый. Уголок автоматизаторов. K178 Masterscada4d формирование json файла из Scada: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=5UmdCHU4omQ&list=PLPDzECHvhfVIOF8EQn1vPVuhpt2-e6iB&index=20>.
5. Методические материалы по MasterSCADA 4D [Электронный ресурс]. URL: <https://masterscada.ru/docs4>.
6. Руководство пользователя OWEN CLOUD [Электронный ресурс]. URL: https://owen.ru/uploads/338/rp_owencloud.pdf.
7. Методика организации обмена информацией между устройствами, поддерживающими Codesys V2.3 и DispSky [Электронный ресурс]. URL: <https://dispky.ru/podderzhka/podderzhivaemye-ustroystva/ustroystva-s-codesys/kontrollery-s-codesys-v-3/>.
8. Колисниченко Д.Н., IRC - боты. Как использовать и как сделать самому. Избранные технологии Интернета / Д.Н. Колисниченко. – М.: Наука и Техника, 2021. – 368 с.
9. Иванов А.В. Создание ботов в Telegram при помощи Python // А.В. Иванов // Журнал "Информационные технологии и вычислительные системы", том 3, №2, 2021. – С. 29-33.

10. Кузнецов А.В. Программирование ботов в Telegram: возможности и ограничения // А.В. Кузнецов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, том 22, №2, 2022. – С. 132-137.

12. Рогачева О.А. Программирование искусственного интеллекта в ботах Telegram // О.А. Рогачева // Материалы научно-практической конференции "Инновационные технологии в современном образовании и производстве", 2021. – С. 72-78.

13. Смирнов В.Н. Особенности разработки ботов в Facebook Messenger и Telegram // В.Н. Смирнов // Сборник статей "Современные технологии информационных систем", 2022. – С. 176-180.

14. Федеральный закон от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ "О персональных данных" // СЗ РФ.-2006. – №31 (ч.1). – Ст. 3451.

15. Амоа, К.А. Разработка программных пакетов на языке Python: учебное пособие / К.А. Амоа, Н.А. Рындин, Ю.С. Скворцов. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2020. – 61 с.

16. Официальная документация Telegram по созданию ботов: <https://core.telegram.org/bots>.

17. Telegram Bot API: <https://core.telegram.org/bots/api>.

18. Hashemi A., Zare Chahooki M.A. Telegram group quality measurement by user behavior analysis. Soc. Netw. Anal. Min. 9, 33 (2019). (accessed: 26 April 2022). DOI: 10.1007/s13278-019-0575-9. – EDN: DAHJEI.

19. Evolyutsiya chat-botiv. [Electronic resource] // TJournal. URL: <https://tjournal.ru/tech/49880-telegram-facts> (accessed: 28 October 2022).

20. Oliphant T.E. "Python for Scientific Computing", in Computing in Science & Engineering. Vol. 9. No. 3. Pp. 10-20, May-June 2007. (accessed: 28 October 2022). – DOI: 10.1109/MCSE.2007.58.

Статья поступила в редакцию 05.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК: 004.032.26
EDN: OV SXIV

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТЕЙ КОЛМОГОРОВА-АРНОЛЬДА ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ

© Автор(ы) 2025
SPIN: 7926-0894
AuthorID: 1280850
ORCID: 0009-0008-2370-9895

МАЙОРОВ Александр Олегович, студент

Пензенский государственный университет

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

Аннотация. Данная статья рассматривает разработку нейронной сети Колмогорова-Арнольда для бесконтактной фотоплетизмографии. Данная проблема актуальна, так как с развитием оптических технологий (распространение дешевых видеокамер), а также с развитием алгоритмов обработки визуальных данных (совершенствование технологий компьютерного зрения) возрос и интерес к неинвазивным методам определения биомаркеров человека, в частности пульса. В данной статье предложена архитектура нейронной сети для решения задачи бесконтактной фотоплетизмографии. Предложенная архитектура основана на теореме Колмогорова-Арнольда. Кроме того, описанная нейронная сеть использует свертки, модули временного сдвига, механизм внимания. Для определения «области интереса» (*region-of-interest*) на исследуемых данных использовался каскад Хаара для распознавания лиц. В работе было проведено сравнение предложенной архитектуры с такими уже известными методами решения, как *Green*, *ICA*, *CHROM*, *POS*, *PBV*, *LGI*, *OMIT*, *DeepPhys*, *PhysNet*, *PhysFormer*, *TS-CAN*, *EfficientPhys*. Для сравнения точности методов использовались следующие метрики: *MAE*, *RMSE*, *MAPE*, коэффициент корреляции Пирсона. Тестирование методов проводилось на трех публично доступных наборах данных: *UBFC-rPPG*, *UBFC-PHYS*, *SCAMPS*. Проведено кросс-датасет тестирование. Предложенная система показала результаты, сравнимые с известными методами.

Ключевые слова: бесконтактная фотоплетизмография, сеть Колмогорова-Арнольда, теорема Колмогорова-Арнольда, сверточная нейронная сеть, метрики.

APPLICATIONS OF KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORKS FOR REMOTE PHOTOPLETHYSMOGRAPHY

© The Author(s) 2025

MAYOROV Alexander Olegovich, undergraduate student

Penza State University

(440026, Russia, Penza, Krasnaya str., 40, e-mail: maiorov-aleksand@mail.ru)

Abstract. This paper discusses the development of a Kolmogorov-Arnold neural network for remote photoplethysmography. This problem is relevant today, because with the development of optical technologies (spread of cheap video cameras), as well as with the development of algorithms for visual data processing (improvement of computer vision technologies), the interest in non-invasive methods for determining human biomarkers, in particular heart rate, has increased. In this paper, we propose a neural network architecture for remote photoplethysmography. The proposed architecture is based on the Kolmogorov-Arnold theorem. In addition, the described neural network utilizes convolutions, Time Shift Modules, and attention mechanism. Haar cascade for face recognition was used to determine the "region-of-interest" on the studied data. The paper compared the proposed architecture with already known methods such as *Green*, *ICA*, *CHROM*, *POS*, *PBV*, *LGI*, *OMIT*, *DeepPhys*, *PhysNet*, *PhysFormer*, *TS-CAN*, *EfficientPhys*. The following metrics were used to compare the accuracy of the methods: *MAE*, *RMSE*, *MAPE*, and Pearson correlation coefficient. The methods were tested on three publicly available datasets: *UBFC-rPPG*, *UBFC-PHYS*, *SCAMPS*. Cross-dataset testing was performed. The proposed system showed results comparable with known methods.

Keywords: remote photoplethysmography, Kolmogorov-Arnold neural network, Kolmogorov-Arnold theorem, convolutional neural network, metrics.

Для цитирования: Майоров А.О. Применение сетей Колмогорова-Арнольда для бесконтактной фотоплетизмографии / А.О. Майоров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 28-35. – EDN: OV SXIV.

Введение. «Фотоплетизмография – метод исследования периферической гемодинамики, основанный на изучении поглощения света, проходящего через исследуемый участок ткани с пульсирующей кровью» [1].

Бесконтактная фотоплетизмография (*Remote Pho-*

*to*plethysmograph, *rPPG* – в англоязычной литературе) отличается отсутствием соприкосновения между устройством сбора данных и анализируемым местом на теле исследуемого. Преимущественно метод бесконтактной фотоплетизмографии (далее ФП) применяется для получения пульса человека в

условиях невозможности прямого взаимодействия с человеком: телемедицина (включая новорожденных [2] и взрослых [3]), вождение [4, 5].

За последние 20 лет было предложено большое количество методов решения задачи бесконтактной ФПГ. Большая часть методов может быть разделена на две группы: классические методы обработки сигналов и методы, основанные на применении нейронных сетей. Приведем обзор методов бесконтактной ФПГ:

1) Классические методы обработки сигналов:

1.1) *Green* [6]: зеленый канал используется для извлечения пульса после пространственного усреднения *RGB*-видео;

1.2) *ICA* [7]: используется анализ независимых компонентов (*Independent Component Analysis*) для нормализованных, пространственно усредненных цветовых сигналов для извлечения значения пульса;

1.3) *CHROM* [8]: используется линейная комбинация сигналов цветности, полученных из *RGB*-видео;

1.4) *POS, plane-orthogonal-to-the-skin* [9]: используется расчет плоскости, перпендикулярной «плоскости оттенка кожи», основанный на физиологических и оптических принципах;

1.5) *PBV* [10]: используется световой спектр для определения значения пульса;

1.6) *LGI* [11]: используется метод представления карт признаков, основанный на инварианте движения;

1.7) *OMIT, Orthogonal Matrix Image Transformation* [12]: используется *QR*-разложение для преодоления артефактов сжатия исходных видео.

2) Методы, основанные на нейронных сетях:

2.1) *DeepPhys* [13]: разветвленная (две ветви) двумерная сверточная нейронная сеть (*2D-CNN*) с механизмом внимания. Два представления – внешность и разность кадров – обрабатываются параллельными ветвями;

2.2) *PhysNet* [14]: трехмерная сверточная сеть (*3D-CNN*). В качестве функции потерь используется коэффициент Пирсона, взятый с обратным знаком (*negative Pearson loss*);

2.3) *PhysFormer* [15]: трехмерная сверточная сеть (*3D-CNN*). В качестве функции потерь используется сложная функция, совмещающая в себе коэффициент Пирсона, взятый с обратным знаком (*negative Pearson loss*), а также функцию потерь перекрестной энтропии;

2.4) *TS-CAN* [16]: разветвленная (две ветви) двумерная сверточная сеть (*2D-CNN*), использующая модуль временного сдвига (*Temporal Shift Module*) для более эффективного временного и пространственного анализа;

2.5) *EfficientPhys* [17]: двумерная сверточная сеть (*2D-CNN*), предназначенная для работы в реальном времени.

Целью данного исследования является разработка нейронной сети Колмогорова-Арнольда (*KAN*) для решения задачи бесконтактной фотоплетизмографии.

Методология. Дж. Цыбенко показал [18], что если $\sigma(z)$ – непрерывная сигмоида, то для любой непрерывной на $[0,1]^n$ функции $f(x)$ существуют

такие значения параметров $H, \alpha_h \in \mathbb{R}, w_h \in \mathbb{R}, w_0 \in \mathbb{R}$, что двухслойная сеть

$$a(x) = \sum_{h=1}^H \alpha_h \sigma(\langle x, w_h \rangle - w_0) \quad (1)$$

равномерно приближает $f(x)$ с любой точностью ε : $|a(x) - f(x)| < \varepsilon$, для всех $x \in [0,1]^n$. Функция $\sigma(z)$ называется сигмной, если $\lim_{z \rightarrow -\infty} \sigma(z) = 0$ и $\lim_{z \rightarrow +\infty} \sigma(z) = 1$. Данная теорема, известная как универсальная теорема аппроксимации или теорема Цыбенко, служит теоретическим обоснованием построения нейронной сети с непрерывной функцией активации, аппроксимирующей любую функцию. Один из самых популярных видов нейронных сетей, многослойный перцептрон (*multilayer perceptron, MLP*), построен на идее, изложенной в теореме Цыбенко. Однако исследователи не оставляли попыток разработать альтернативные виды нейронных сетей, а также теоретически обосновать возможность их использования. Так Р. Хехт-Нильсен показал [19], что для построения нейронной сети может быть использована теорема Колмогорова-Арнольда [20, 21]. Теорема Колмогорова-Арнольда гласит, что любая непрерывная функция n переменных на единичном кубе представима в виде суперпозиции непрерывных функций одного аргумента и операции сложения:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^{2^{n+1}} \Phi_k \left(\sum_{j=1}^n \varphi_{jk}(x_j) \right), \quad (2)$$

где Φ_k – непрерывные функции, и φ_{ik} не зависят от f . Тем не менее использование теоремы Колмогорова-Арнольда активно критиковалось исследователями [22, 23] из-за того, что функции Φ_k и φ_{ik} не гладкие и сложно устроены. Однако в недавнем исследовании З. Лю, И. Ванг, С. Вайдья, Ф. Рюле, Дж. Халверсон, М. Солянич, Томас Й. Хоу, Марк Тегмарк смогли преодолеть ограничения теоремы Колмогорова-Арнольда [24] следующим образом:

$x_h^l = \sum_{k=1}^{H_{l-1}} \varphi_{kh}^l(x_k^{l-1})$ – вектор на выходе l -го слоя, $l=1, \dots, L$;

$\varphi_{kh}^l(x) = w_b b(x) + w_s s(x)$ – функция одной переменной;

$b(x) = \frac{x}{1 + e^{-x}}$ – сглаженный *ReLU* (*SiLU*);

$s(x) = \sum_i c_i B_i(x)$ – одномерный сплайн по базису $\{B_i\}$.

В оригинальной работе З. Лю и др. исследовали сети Колмогорова-Арнольда (*Kolmogorov-Arnold Network, KAN*), в которых $s(x)$ являются *B*-сплайнами степени 3, также авторы отметили, что в качестве $s(x)$ могут выступать и другие функции: радиально-базисные функции, вейвлеты, полиномы и др. Так, З. Ли показал, что использование радиально-базисных функций вида (3) не только представляет собой прямую альтернативу *B*-сплайнам, но и значительно повышает скорость обучения всей сети [25].

$$s(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2h^2}\right), \quad (3)$$

где $r = x - x_i$ – расстояние между x и точкой x_i , называемой центром, h – среднее квадратичное отклонение.

Наша реализация сети Колмогорова-Арнольда использует радиально-базисные функции в качестве $s(x)$.

Дальнейшие исследования показали, что сети Колмогорова-Арнольда можно использовать для построения сверточных нейронных сетей. Так, А.Д. Боднер, Дж.Н. Спольски, А.С. Теплич, С. Пурто предложили следующее построение свертки на основе сети Колмогорова-Арнольда [26]: пусть $K_{ij} = \varphi_{ik}(x)$, $i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M$ – ядро свертки, $Image$ – матрица изображения такая, что

$$Image = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mp} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Тогда результатом свертки будет

$$(Image * K)_{i,j} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M \varphi_{kl}(a_{i+k,j+l}). \quad (5)$$

Например, если

$$K = \begin{pmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

то результат свертки равен

$$Image * K = \begin{pmatrix} r_{11} & L & r_{p-1,1} \\ M & O & M \\ r_{m-1,1} & L & r_{p-1,p-1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

где $r_{ij} = \varphi_{11}(a_{ij}) + \varphi_{12}(a_{i,j+1}) + \varphi_{21}(a_{i+1,j}) + \varphi_{22}(a_{i+1,j+1})$.

Для повышения точности результата модель должна эффективно обрабатывать временные и пространственные изменения на обрабатываемом видеосигнале. Аналогично работе С. Лю, Дж. Фромма, Ш. Пателя, Д. Макдаффа [27] мы используем модули внимания и модули временного сдвига для эффективной работы системы.

Сверточный модуль внимания (*convolutional block attention module*) «состоит из двух последовательно применяемых подмодулей – канального (применяется ко всем каналам одного пикселя с изображения) и пространственного (применяется ко всему изображению с фиксированным каналом)» [28]. Аналогично исследованию В. Чена и Д. Макдаффа [29] наш модуль внимания использует l_1 -регуляризацию, однако вместо стандартного механизма свертки нами был использован механизм свертки с применением сети Колмогорова-Арнольда.

Пусть $x_a \in \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ и $x_m \in \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ – множества признаков канальной ветви и пространственной ветви соответственно, где C – число каналов, H – высота, а W – длина изображения. Тогда маска внимания $q \in \mathbb{R}^{1 \times H \times W}$ может быть найдена как

$$q = \frac{HW \cdot \varphi(x_a)}{2 \|\varphi(x_a)\|_1}, \quad (8)$$

где φ – ядро сверточного модуля Колмогорова-Арнольда размерностью 1×1 .

Полученная маска умножается на множество признаков пространственной ветви:

$$z_m = (1 \bullet q) * x_m, \quad (9)$$

где $1 \in \mathbb{R}^C$ – вектор из всех единиц, $z_m \in \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ – итоговое множество признаков, передаваемое в следующий слой сети, $*$: $\mathbb{R}^{C \times H \times W} \times \mathbb{R}^{C \times H \times W} \rightarrow \mathbb{R}^{C \times H \times W}$ – поэлементное умножение.

Модуль временного сдвига (*temporal shift module*, *TSM*) [30] помогает добиться точности трехмерных сверточных сетей с помощью двухмерных. Модуль производит сдвиги тензоров: модуль разбивает входной тензор на три части по *RGB*-каналам. Затем модуль сдвигает первую часть влево на одну позицию, увеличивая время на один кадр, а вторую часть сдвигает вправо на одну позицию, уменьшая время на один кадр. Обе операции сдвига производятся вдоль оси времени, в то время как третья часть остается на своем изначальном месте. Следует также отметить, что использование модуля временного сдвига не увеличивает количество параметров системы, но при этом позволяет соседним кадрам обмениваться информацией. Это существенно повышает точность системы.

Устройство предложенной нейронной сети представлено на рисунке 1. Для работы системы исходные данные (необработанные видео) проходят препроцессинг. А именно автоматически на видео определяется область анализа (в нашем случае лицо испытуемого) с помощью каскада Хаара [31]. Далее видео обрезается по определенной области и сжимается или растягивается до фиксированного разрешения (72×72). Подготовленные данные используются для обучения или тестирования нейронной сети.

Предложенная нейронная сеть состоит из двух ветвей. Одна анализирует изменения данных во времени, в то время как вторая ветвь обрабатывает внешний вид кадра в текущий момент. На вход ветви внешнего вида подаются нормализованные разницы соседних кадров. Так для соседних кадров $c(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 72 \times 72}$ и $c(t+1) \in \mathbb{R}^{3 \times 72 \times 72}$ новый кадр $c'(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 72 \times 72}$ следующим образом:

$$c'(t) = \frac{c(t+1) - c(t)}{c(t) + c(t+1)} \quad (10)$$

После этого все полученные $c'(t)$ нормализуются как

$$z_i(t) = \frac{c'_i(t)}{S(c'(t))}, \quad (11)$$

где $S(c'(t))$ – стандартное отклонение разниц соседних кадров.

На вход ветви движения подаются z -стандартизованные кадры. Так, для кадра $c_i(t)$ новый кадр $z_i(t)$ находится следующим образом:

$$z_i(t) = \frac{c_i(t) - \overline{c(t)}}{S(c(t))}, \quad (12)$$

где $\overline{c(t)}$ – среднее значение всех кадров, $S(c(t))$ – стандартное отклонение всех кадров.

Ветвь движения имеет два сверточных слоя Колмогорова-Арнольда (*KanConv2D*) с размерностью ядра 3, перед которыми следуют модули временно-

го сдвига. После сверточных слоев следуют пулинговые слои с функцией среднего (*average pooling*), а также метод дропаут (*dropout*). Это необходимо для уменьшения размерности обрабатываемых данных, а также для борьбы с переобучением.

Ветвь внешнего вида имеет два сверточных слоя Колмогорова-Арнольда (*KanConv2D*), соединенных пулинговым слоем с функцией среднего (*average pooling*) и методом дропаут (*dropout*). Результаты работы сверточных слоев ветви внешнего вида используются для расчета масок внимания. Маски внимания поэлементно умножаются на результаты работы сверточных слоев ветви движения. В конце

сети присутствует полносвязный слой с одним выходом. Данный выход – предсказанное значение пульса испытуемого в данный момент.

При обучении сети в качестве оптимизатора модели использовался *AdamW*, в качестве функции ошибок использовалась среднеквадратичная ошибка (*MSELoss*). Коэффициент скорости обучения равен 0.009, обучение проходило в течение 30 эпох. Обучение производилось на персональном компьютере с процессором *Intel Core i5-12600k*, 16 Gb RAM DDR4, с использованием *CUDA* графического ускорителя *NVIDIA GTX 1660 Super 6Gb VRAM*, на операционной системе *WSL2 Ubuntu 22.04.3 LTS*.

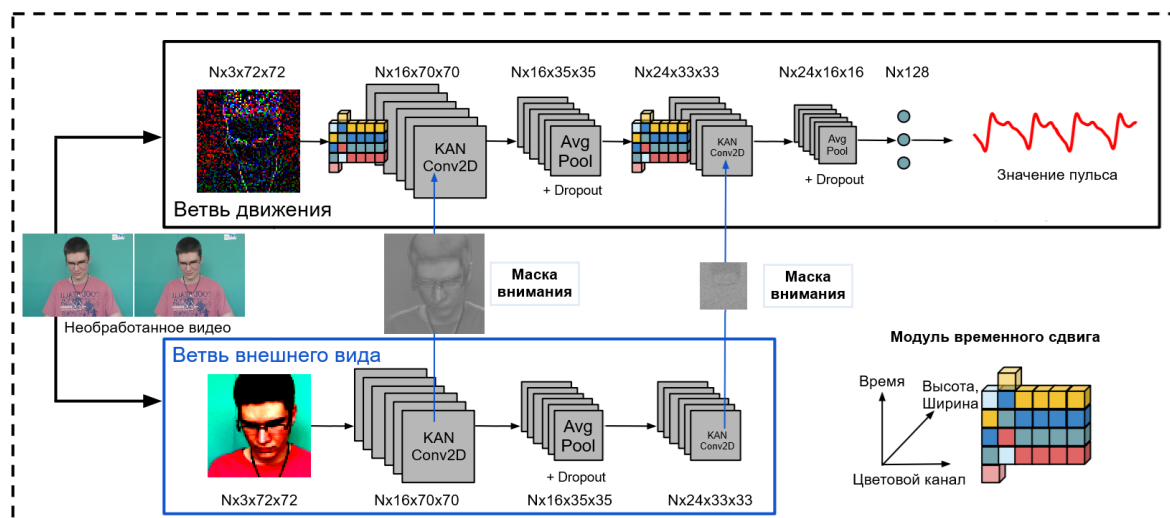


Рисунок 1 – Устройство предложенной нейронной сети (N – размер батча)

Результаты. Для оценки качества предложенной модели проводилось кросс-датасет тестирование. Для тестирования были выбраны 3 публично доступных датасета:

1. *UBFC-rPPG: Univ. Bourgogne Franche-Comté Remote PhotoPlethysmoGraphy*. Данный датасет представляет собой набор из 42 видео, записанных с помощью веб-камеры *Logitech C920 HD Pro*, при 30 кадрах в секунду с разрешением 640x480 в несжатом 8-битовом RGB формате. Для измерения пульса использовался пальчиковый пульсоксиметр *CMS 50E*. Исследуемые располагались на расстоянии примерно одного метра от камеры. Записи были произведены в помещении при комбинированном освещении.

2. *UBFC-Phys: A Multimodal Database For Psychophysiological Studies Of Social Stress*. Данный датасет представляет собой набор из 168 видео, записанных с помощью цифровой камеры *EO-23121C RGB*, при 35 кадрах в секунду с разрешением 1024x1024. Количество исследованных – 56 человек. Каждый исследуемый выполнял 3 задания: отдых, разговор, выполнение математических операций. Датасет содержит информацию о пульсе и электрической активности кожи исследуемых, записанных с помощью электронного браслета *Empatica E4*. Исследуемые располагались на расстоянии в примерно

одного метра от камеры. Записи были произведены в помещении при комбинированном освещении. Из-за ограниченности вычислительных мощностей при анализе использовались только первые 30 секунд каждого видео.

3. *SCAMPS: Synthetics for Camera Measurement of Physiological Signals*. Данный датасет представляет собой набор из 2800 синтетических видео, на которых изображены 3D-аватары, сделанные в программе *Blender*. Аватары были созданы с помощью сложного алгоритма, что позволило получить квази-фотореалистичные видео. Чтобы обеспечить надежные условия при использовании датасета при обучении модели и тестировании, в видео были учтены такие факторы, как движения головы, выражение лица и изменения в освещении. Из-за ограниченности вычислительных мощностей при анализе использовались только первые 200 кадров каждого видео.

На рисунке 2 продемонстрирован пример фотоплетизмограммы, полученной с помощью сети Колмогорова-Арнольда.

Для оценки качества модели использовались следующие метрики:

1) Средняя абсолютная ошибка (*mean absolute error; MAE*): для предсказанного значения R_p ,

эталонных данных R_g и N значений

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |R_g - R_p| \quad (13)$$

2) Среднеквадратичное отклонение (*root mean squared error, RMSE*): для предсказанного значения R_p , эталонных данных R_g и N значений

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (R_g - R_p)^2} \quad (14)$$

3) Средняя абсолютная процентная ошибка (*mean absolute percentage error, MAPE*): для предсказанного значения R_p , эталонных данных R_g и N значений

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{R_g - R_p}{R_g} \right| \quad (15)$$

4) Коэффициент корреляции Пирсона (ρ): для предсказанного значения R_p , эталонных данных R_g , N

значений и $\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N}$

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N (R_{g,n} - \bar{R}_g)(R_{p,n} - \bar{R}_p)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (R_{g,n} - \bar{R}_g)^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (R_{p,n} - \bar{R}_p)^2}} \quad (16)$$

5) Стандартная ошибка (*standard error, SE*): для всех метрик, кроме коэффициента корреляции Пирсона

$$SE = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

σ – среднеквадратичное отклонение, n – количество

значений.

Для коэффициента корреляции Пирсона

$$SE_\rho = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}} \quad (18)$$

ρ – коэффициент корреляции Пирсона, n – количество значений.

В таблицах 1-3 приведены показатели качества представленной модели в сравнении с показателями других методов.

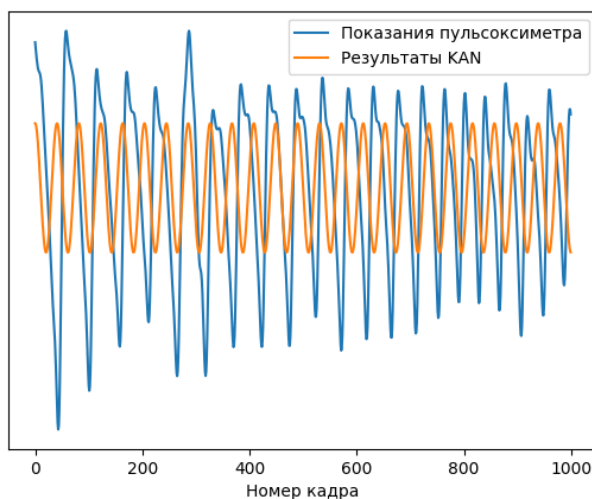


Рисунок 2 – Сравнение исходной фотоплетизмограммы с фотоплетизмограммой, полученной с помощью KAN-сети (датасет UBFC-PHYS)

Таблица 1 – Сравнение предложенной модели с другими методами (тестовый датасет – UBFC-PHYS)

	Метод	Тренировочные данные	Тестовые данные			
			UBFC-PHYS			
			MAE±SE	RMSE±SE	MAPE±SE	$\rho \pm SE_\rho$
Классические методы	Green	N/A	19.82±3.78	31.49±240.46	18.78±3.35	0.37±0.15
	ICA	N/A	14.70±2.87	23.71±141.20	14.34±2.64	0.53±0.13
	CHROM	N/A	3.98±1.20	8.72±33.85	3.78±1.09	0.89±0.07
	LGI	N/A	15.80±3.67	28.55±236.17	14.70±3.20	0.36±0.15
	PBV	N/A	15.90±3.25	26.39±199.71	15.17±2.91	0.48±0.14
	POS	N/A	4.00±0.99	7.58±21.65	3.86±0.90	0.92±0.06
	OMIT	N/A	15.80±3.67	28.55±236.17	14.70±3.20	0.36±0.15
Нейронные сети	TS-CAN	UBFC-rPPG	7.80±1.02	12.92±6.19	9.90±1.26	0.56±0.08
		SCAMPS	6.79±0.09	11.24±5.39	8.61±1.10	0.64±0.09
	PhysNet	UBFC-rPPG	9.00±1.24	15.33±7.19	12.59±1.89	0.44±0.09
		SCAMPS	7.83±1.08	13.33±6.26	10.95±1.64	0.51±0.11
	PhysFormer	UBFC-rPPG	9.12±1.23	15.34±7.13	12.51±1.87	0.40±0.09
		SCAMPS	7.93±1.07	13.34±6.20	10.89±1.62	0.45±0.10
	DeepPhys	UBFC-rPPG	10.72±1.30	16.87±7.28	13.15±1.51	0.38±0.09
		SCAMPS	9.32±1.13	14.68±6.33	11.44±1.31	0.44±0.10
	EfficientPhys	UBFC-rPPG	8.28±0.99	12.95±5.42	10.52±1.28	0.58±0.08
		SCAMPS	7.20±0.86	11.27±4.71	9.15±1.11	0.67±0.12
	KAN	UBFC-rPPG	9.16±1.14	14.68±6.36	10.97±1.27	0.52±0.09
		SCAMPS	7.96±0.99	12.77±5.53	9.54±1.10	0.60±0.11

Таблица 2 – Сравнение предложенной модели с другими методами (тестовый датасет – UBFC-rPPG)

	Метод	Тренировочные данные	Тестовые данные			
			UBFC-rPPG			
			MAE±SE	RMSE±SE	MAPE±SE	$\rho \pm SE_p$
Классические методы	Green	N/A	15.81±1.39	21.12±60.41	18.98±1.60	0.25±0.10
	ICA	N/A	11.92±1.35	18.02±56.65	14.73±1.79	0.23±0.10
	CHROM	N/A	8.62±1.19	14.74±46.63	11.50±1.76	0.39±0.09
	LGI	N/A	9.01±1.07	14.04±34.83	11.15±1.30	0.63±0.08
	PBV	N/A	13.17±1.30	18.58±50.54	15.84±1.47	0.36±0.09
	POS	N/A	8.00±1.06	13.3±38.91	10.90±1.64	0.47±0.09
	OMIT	N/A	8.53±1.04	13.47±33.70	10.37±1.21	0.65±0.08
Нейронные сети	TS-CAN	UBFC-PHYS	8.55±1.28	14.05±6.82	10.81±1.42	0.44±0.15
		SCAMPS	7.47±0.99	12.36±5.93	9.48±1.12	0.58±0.12
	PhysNet	UBFC-PHYS	11.07±1.51	17.66±7.74	13.24±1.67	0.39±0.10
		SCAMPS	9.63±1.19	15.45±6.69	11.55±1.33	0.43±0.16
	PhysFormer	UBFC-PHYS	8.99±1.48	14.91±7.10	12.24±1.61	0.41±0.14
		SCAMPS	7.77±1.04	13.07±6.07	10.67±1.16	0.52±0.11
	DeepPhys	UBFC-PHYS	11.77±1.71	18.36±8.09	14.37±1.92	0.32±0.17
		SCAMPS	10.25±1.24	16.15±6.96	12.58±1.44	0.49±0.09
	EfficientPhys	UBFC-PHYS	8.71±1.38	14.48±6.86	11.87±1.97	0.44±0.20
		SCAMPS	7.65±1.12	12.79±6.00	10.46±1.65	0.53±0.18
	KAN	UBFC-PHYS	9.84±1.05	15.93±6.78	11.85±1.17	0.33±0.12
		SCAMPS	7.73±0.96	12.41±5.37	9.27±1.06	0.58±0.10

Таблица 3 – Сравнение предложенной модели с другими методами (тестовый датасет – SCAMPS)

	Метод	Тренировочные данные	Тестовые данные			
			SCAMPS			
			MAE±SE	RMSE±SE	MAPE±SE	$\rho \pm SE_p$
Классические методы	Green	N/A	34.97±0.46	42.12±39.69	32.39±0.37	0.03±0.02
	ICA	N/A	33.23±0.46	41.06±38.48	31.76±0.38	0.01±0.02
	CHROM	N/A	28.97±0.40	35.77±29.85	29.17±0.40	0.02±0.02
	LGI	N/A	32.09±0.45	39.83±36.54	31.33±0.41	0.02±0.02
	PBV	N/A	33.46±0.45	41.16±38.00	32.21±0.39	0.01±0.02
	POS	N/A	31.18±0.43	38.58±35.04	31.30±0.42	0.01±0.02
	OMIT	N/A	32.05±0.45	39.77±36.52	31.28±0.41	0.02±0.02
Нейронные сети	TS-CAN	UBFC-rPPG	15.01±2.29	24.63±11.98	18.96±2.53	0.09±0.03
		UBFC-PHYS	16.96±2.01	28.22±13.41	21.58±2.57	0.14±0.02
	PhysNet	UBFC-rPPG	19.42±2.69	30.95±13.60	23.22±2.97	0.15±0.02
		UBFC-PHYS	19.60±2.53	33.52±15.62	27.49±3.96	0.17±0.03
	PhysFormer	UBFC-rPPG	15.78±2.63	26.14±12.47	21.47±2.86	0.11±0.02
		UBFC-PHYS	17.24±2.15	29.14±13.12	23.75±3.36	0.09±0.02
	DeepPhys	UBFC-rPPG	20.64±3.04	32.18±14.20	25.19±3.41	0.11±0.03
		UBFC-PHYS	21.24±2.11	34.41±12.41	23.12±2.12	0.14±0.05
	EfficientPhys	UBFC-rPPG	15.29±2.46	25.39±12.05	20.82±3.49	0.12±0.04
		UBFC-PHYS	18.34±4.21	33.22±15.32	24.12±5.12	0.12±0.04
KAN	UBFC-rPPG	17.27±1.88	27.92±11.91	20.78±2.09	0.11±0.04	
	UBFC-PHYS	19.96±1.33	28.85±15.51	20.34±2.01	0.10±0.03	

На рисунке 3 представлено исследование эффективности использования системных ресурсов: сравнение времени обучения и количество параметров сети Колмогорова-Арнольда в сравнении

с аналогами. Величина средней абсолютной ошибки (*MAE*) представлена для обучения при тренировочном датасете *SCAMPS* и тестировании на датасете *UBFC-rPPG*.

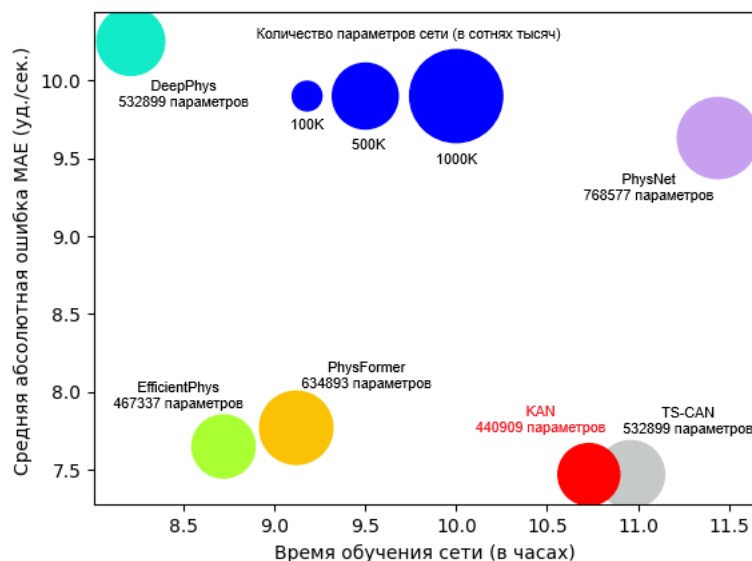


Рисунок 3 – Время обучения, количество параметров сети Колмогорова-Арнольда в сравнении с аналогами

Обсуждение. Из таблиц 1, 2 и 3 следует, что нельзя выделить метод, который бы показывал лучшие результаты во всех возможных условиях (при разных тренировочных и тестовых данных). Это связано с тем, что датасеты сильно отличаются друг от друга по множеству параметров: частота кадров, качество записи, условия освещенности, наличие или отсутствие движения на видео. Однако можно отметить, что предложенная реализация решения задачи бесконтактной фотоплетизмографии достигает точности, сопоставимой с другими методами. Также следует отметить, что при меньшем количестве параметров системы (рис. 3) сеть Колмогорова-Арнольда достигает уровня точности аналогов.

Выводы. Появление массово доступной и компактной фото- и видеоаппаратуры, а также развитие методов компьютерного зрения стимулировало интерес к неинвазивным методам диагностики частоты сердечных сокращений человека – бесконтактной фотоплетизмографии. Предложенная архитектура нейронной сети, основанная на теореме Колмогорова-Арнольда, показала свою работоспособность с помощью проведенных исследований.

Дальнейшие разработки можно продолжить в направлении повышения точности предложенной системы. Также возможно рассмотреть возможность создания системы, определяющей пульс испытуемого в режиме реального времени или «онлайн».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горчаков В.Н. Беспроводная система сбора данных фотоплетизмографии / Горчаков В.Н. // Радиотехника и электроника: сборник тезисов докладов 56-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, апрель-май 2020 года / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2020. – С. 132.
2. Lonneke A.M. Aarts, Vincent Jeanne, John P. Cleary, C. Lieber, J. Stuart Nelson, Sidarto Bambang Oetomo, and Wim Verkruysse. 2013. Non-contact heart rate monitoring utilizing camera photoplethysmography in the neonatal intensive care unit – A pilot

study. Early human development. – V. 89. – №12 (2013). – P. 943-948.

3. L. Tarassenko, M. Villarroel, A. Guazzi, J. Jorge, D.A. Clifton, and C. Pugh. 2014. Non-contact video-based vital sign monitoring using ambient light and auto-regressive models. Physiological measurement. – V. 35. – №5 (2014). – P. 807.

4. Ewa Magdalena Nowara, Tim K. Marks, Hassan Mansour, and Ashok Veeraraghavan. 2018. SparsePPG: Towards Driver Monitoring Using Camera-Based Vital Signs Estimation in Near-Infrared. In Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1st International Workshop on Computer Vision for Physiological Measurement.

5. John Gideon and Simon Stent. 2021. The Way to my Heart is through Contrastive Learning: Remote Photoplethysmography from Unlabelled Video. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – P. 3995-4004.

6. Wim Verkruysse, Lars O. Svaasand, and J. Stuart Nelson. Remote plethysmographic imaging using ambient light. Optics express. – V. 16. – №26 (2008). – P. 21434-21445.

7. Ming-Zher Poh, Daniel J. McDuff, and Rosalind W. Picard. Advancements in noncontact, multiparameter physiological measurements using a webcam. IEEE transactions on biomedical engineering. – V. 58. – №1 (2010). – P. 7-11.

8. Gerard De Haan and Vincent Jeanne. Robust pulse rate from chrominance-based rppg. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – V. 60. – №10 (2013). – P. 2878-2886.

9. Wenjin Wang, Albertus C. den Brinker, Sander Stuijk, and Gerard de Haan. Algorithmic principles of remote ppg. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – V. 64. – №7 (2016). – P. 1479-1491.

10. Gerard De Haan and Arno Van Leest. Improved motion robustness of remote-ppg by using the blood volume pulse signature. Physiological measurement. – V. 35. – №9 (2014). – P. 1913.

11. Christian S. Pilz, Sebastian Jaunseder, Jarek Krajewski, and Vladimir Blazek. Local group invariance for heart rate estimation from face videos in the wild. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops. – 2018. – P. 1254-1262.

12. Face2PPG: An unsupervised pipeline for blood volume pulse extraction from faces Constantino Álvarez Casado, Miguel Boddallo.

13. Weixuan Chen and Daniel McDuff. DeepPhys: Video-Based Physiological Measurement Using Convolutional Attention Networks. arXiv:1805.07888 [cs], August 2018.

14. Zitong Yu, Wei Peng, Xiaobai Li, Xiaopeng Hong, and Guoying Zhao. Remote heart rate measurement from highly compressed facial videos: an end-to-end deep learning solution with video enhancement. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2019. – P. 151-160.

15. Zitong Yu, Yuming Shen, Jingang Shi, Hengshuang Zhao, Philip H.S. Torr, and Guoying Zhao. Physformer: Facial video-ba-

sed physiological measurement with temporal difference transformer. In Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2022. – P. 4186-4196.

16. Xin Liu, Josh Fromm, Shwetak Patel, and Daniel McDuff. Multi-task temporal shift attention networks for on-device contactless vitals measurement. Advances in Neural Information Processing Systems. – 2020. – V. 33. – P. 19400-19411.

17. Xin Liu, Brian Hill, Ziheng Jiang, Shwetak Patel, and Daniel McDuff. Efficientphys: Enabling simple, fast and accurate camera-based cardiac measurement. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. – 2023. – P. 5008-5017.

18. Cybenko G.V. Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function // Mathematics of Control Signals and Systems. – 1989. – V. 2. – №4. – P. 303-314.

19. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks, San Diego. – 1987. – V. 3. – P. 11-13.

20. А.Н. Колмогоров. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных. – 1956.

21. В.И. Арнольд. О функции трех переменных. – 1957.

22. Tomaso Poggio, Andrzej Banburski, and Qianli Liao. Theoretical issues in deep networks. Proceedings of the National Academy of Sciences. – V. 117. – №48 (2020). – P. 30039-30045.

23. Federico Girosi and Tomaso Poggio. Representation properties of networks: Kolmogorov's theorem is irrelevant. Neural Computation. – V. 1. – №4 (1989). – P. 465-469.

24. Ziming Liu, Yixuan Wang, Sachin Vaidya, Fabian Ruehle, James Halverson, Marin Soljacic, Thomas Y. Hou, Max Tegmark. KAN: Kolmogorov–Arnold Networks.

25. Ziyao Li. Kolmogorov-Arnold Networks are Radial Basis Function Networks.

26. Alexander Dylan Bodner, Jack Natan Spolski, Antonio Santiago Tepsich, Santiago Pourteau. CONVOLUTIONAL KOLMOGOROV-ARNOLD NETWORKS.

27. Xin Liu, Josh Fromm, Shwetak Patel, and Daniel McDuff. Multi-task temporal shift attention networks for on-device contactless vitals measurement. Advances in Neural Information Processing Systems. – V. 33 (2020). – P. 19400-19411.

28. Механизм внимания [Электронный ресурс]: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Механизм_внимания (дата обращения 02.02.2025).

29. Weixuan Chen and Daniel McDuff. Deepphys: Video-based physiological measurement using convolutional attention networks. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). – 2018. – P. 349-365.

30. Ji Lin, Chuang Gan, and Song Han. Tsm: Temporal shift module for efficient video understanding. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. – 2019. – P. 7083-7093.

31. FaceDetection using Haar Cascades [Электронный ресурс]: https://docs.opencv.org/4.x/d2/d99/tutorial_js_face_detection.html (дата обращения 02.02.2025).

Статья поступила в редакцию 04.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 681.5

EDN: LFATSX

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫМ ВЫТЯЖНЫМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 6172-4685

AuthorID: 616710

ШВАРЦБУРГ Леонид Эфраимович, доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

(127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 3А, e-mail: lesh@stankin.ru)

SPIN: 8744-7444

AuthorID: 1006818

КУЛИЗАДЕ Дмитрий Игорьевич, старший преподаватель

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

(127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 3А., e-mail: d.kulizade@stankin.ru)

РОДЬКИН Сергей Валерьевич, аспирант

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

(127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 3А., e-mail: rodkin.serezha1999@yandex.ru)

Аннотация. В данной работе представлен алгоритм управления локальным вытяжным устройством, предназначенным для удаления вредных аэрозолей из рабочей зоны. Выявлены ограничения существующих методов мониторинга качества воздуха и сформулированы задачи автоматизированного контроля параметров воздуха с использованием датчика MQ-9. Предложена методика калибровки газоанализатора, позволяющая с высокой точностью сравнивать показания датчиков с нормативными значениями концентраций загрязняющих веществ. На примере лазерного станка *Zerder Flex 1060*. Описаны этапы отладки эффективной автоматизированной системы, способной обеспечить непрерывный мониторинг качества воздуха в производственной среде. Применение алгоритма в системе, обеспечивает своевременный контроль концентрации токсичных веществ в воздухе производственных помещений, способствует повышению уровня безопасности труда и оптимизации технологических процессов.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, локальное вытяжное устройство, мониторинг воздуха, контроль концентрации, газоанализатор, калибровка датчиков.

ALGORITHM OF AUTOMATED CONTROL OF LOCAL EXHAUST UNIT FOR PRODUCTION EQUIPMENT

© The Author(s) 2025

SHVARTSBURG Leonid Efraimovich, doctor of technical sciences,
professor, head of the department of engineering ecology and life safety

MSUT "STANKIN"

(127055, Moscow, Vadkovsky per., 3A, e-mail: lesh@stankin.ru)

KULIZADE Dmitry Igorevich, senior lecturer

MSUT "STANKIN"

(127055, Moscow, Vadkovsky per., 3A, e-mail: d.kulizade@stankin.ru)

RODKIN Sergey Valerievich, post-graduate student

MSUT "STANKIN"

(127055, Moscow, Vadkovsky per., 3A, e-mail: rodkin.serezha1999@yandex.ru)

Abstract. This paper presents a method of software development and debugging for automated control system of local exhaust device designed to remove harmful aerosols from the working area. The urgency of the problem associated with the increase in the concentration of toxic substances in the atmosphere of industrial premises and their negative impact on the health of workers and the economy of the country is substantiated. The existing methods of air quality monitoring are analyzed, their limitations such as high cost, complexity of maintenance and lack of continuity of measurements are revealed. The main attention is paid to the development of an algorithm that provides automated control of air parameters by integrating data obtained from various sensors, including gas analyzer model Kolion-1B-26 and sensor MQ-9. The method of reference calibration is proposed, which allows to accurately match sensor readings with normative values of pollutant concentrations, which is realized through empirically selected parameters of the calibration formula. The stages of system debugging are described in detail, including preheating, stabilization of sensor operation and sequence of measurements under dynamic operating conditions of the *Zerder Flex 1060* laser machine. The obtained results demonstrate the possibility of creating an effective automated system capable of providing continuous monitoring of air quality in the production environment, which contributes to the improvement of work safety and optimization of technological processes.

Keywords: automated control system, local exhaust unit, air monitoring, concentration control, gas analyzer, sensor calibration.

Для цитирования: Шварцбург Л.Э. Алгоритм автоматизированного управления локальным вытяжным устройством для производственного оборудования / Л.Э. Шварцбург, Д.И. Кулизаде, С.В. Родькин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 36-39. – EDN: LFATSX.

Введение. Расширяющаяся сфера применения химических и физико-химических технологий производства повысила актуальность автоматизированного контроля выброса вредных веществ в окружающую среду. Ущерб от негативного воздействия загрязненного воздуха на здоровье человека в нашей стране оценивается примерно в 12,5% от валового внутреннего продукта. Это превышает бюджет здравоохранения в части защиты окружающей среды, более 90% которого направляется на снижение пагубного влияния вредных химических факторов на здоровье работников [1]. Мониторинг качества воздуха в рабочей зоне, осуществляемый традиционными методами оценки проб воздуха, сопряжен с затратами времени и средств на обслуживание точных измерительных приборов. В этой связи повышается интерес к автоматизированным средствам экологического мониторинга состояния воздуха в производственных помещениях.

Методология. Цель данного исследования состоит в совершенствовании методов контроля и удаления вредных примесей в рабочей зоне технологического оборудования путем создания алгоритма автоматизированного управления локальным вытяжным устройством.

С этой целью на примере работы лазерного станка *Zerder Flex 1060* отработана методика определения предельно допустимой концентрации углекислого газа CO_2 , что позволило корректно настроить программную часть системы управления и оптимизировать временные характеристики отклика системы на изменения концентрации CO_2 . Исходными посылками для выполнения исследования послужили нормативные документы по контролю состава вредных веществ в воздухе. В соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 для этого должны использоваться автоматические газоанализаторы или газоаналитические комплексы, соответствующие требованиям ГОСТ 13320-81 и отвечающие требованиям методике выполнения измерений. Действующие стандарты ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» и ГОСТ 13320-81 «Промышленная чистота. Классификация аэрозолей» регламентируют параметры воздушной среды в производственных помещениях [2-3]. Однако, ввиду стремительного развития технологий некоторые положения упомянутых документов устарели и не отражают реалии современных производственных процессов и требования безопасности труда. Все это обуславливает необходимость выработки новых подходов к оценке потенциальных угроз и минимизации рисков, связанных с воздействием

вредных аэрозолей, за счет автоматизированного сбора, обработки и анализа данных, полученных с датчиков.

В экспериментах для измерения взвеси вредных аэрозолей в воздухе рабочей зоны использовался газоанализатор модели *Колион-1В-26*, включающий несколько специальных детекторов для распознавания и количественного анализа различных химических веществ в воздушной среде. Электрохимический сенсор данного газоанализатора *MQ-9* способен фиксировать концентрацию монооксида углерода CO после предварительной отладки и калибровки с применением точных газоанализаторов. Для сопоставления показаний датчика и эталонного газоанализатора использовался метод опорной или сравнительной калибровки, состоящий из следующих этапов.

1. Предварительный прогрев и стабилизация работы датчика *MQ-9*. Калибровка его чувствительного элемента для корректной работы требует однократного длительного прогрева от 36 до 48 часов, после чего стабилизация показаний занимает 60 секунд.

2. Измерение точного значения концентрации контролируемого газа. При этом датчик размещают в помещении, где концентрация целевого газа близка к нормативному значению – получают ее опорное значение для последующей калибровки.

3. Определение базового сопротивления R_0 . Эта процедура необходима для оценки рабочей концентрации газа по отношению R_s/R_0 , где R_s – сопротивление датчика в рабочих условиях, а R_0 – его сопротивление в условиях чистого воздуха. Значение R_0 вычисляется по известной концентрации, отражаемой прибором *Колион-1В-26*.

4. Подбор калибровочного коэффициента C , который требуется для линеаризации зависимости сопротивления от концентрации, которая обычно описывается логарифмическим законом. Коэффициент рассчитывается как

$$C = K(R_s / R_0)^{-\alpha},$$

где K и α – эмпирические параметры, определяемые на основании серии измерений, одновременно проводимых приборами *MQ-9* и *Колион-1В-26*.

Полученные в результате описанных процедур данные используются далее для разработки алгоритма функционирования системы управления вытяжным устройством.

Результаты. Для управления локальным вытяжным устройством разработан алгоритм (рис. 1), учитывающий данные о концентрации аэрозолей. На первом этапе в систему загружаются сведения о характеристиках датчиков, предельных

значениях концентраций и возможных скоростях вращения вентилятора. Если пользователь выбирает продолжение работы системы, то начинается основной цикл работы алгоритма с постоянным анализом входных параметров. Система анализирует данные, поступающие от сенсоров, и фиксирует превышение установленных пороговых значений. Если зафиксировано превышение предельно допустимой концентрации монооксида углерода (CO), то система включает вентиляцию с необходимой скоростью работы вентилятора. В противном случае вентиляция не включается. Актуальные значения контролируемых параметров непрерывно выводятся на монитор. Процесс повторяется, пока не будет принято решение о завершении работы программы [4-12].

На рисунке 2 показан фрагмент программного

кода, написанного на языке C++ для *Open source* с использованием типовых библиотек. Рассмотрим основные аспекты и преимущества данной программной реализации. Аналоговый датчик подключен к входу A0 микроконтроллера. Он измеряет уровень концентрации дыма или газа в окружающей среде, и преобразует аналоговое значение в цифровой код от 0 до 1023. Индикация уровня опасности осуществляется светодиодами: красный светодиод сигнализирует о высоком уровне опасности, желтый – о нормальном, а зеленый – о низком. Пьезоэлектрический излучатель (BUZZER) включается при обнаружении высокого уровня дыма или газа.

Монитор отображает текущий уровень загрязнения в текстовом формате, что позволяет пользователю наблюдать состояние системы.

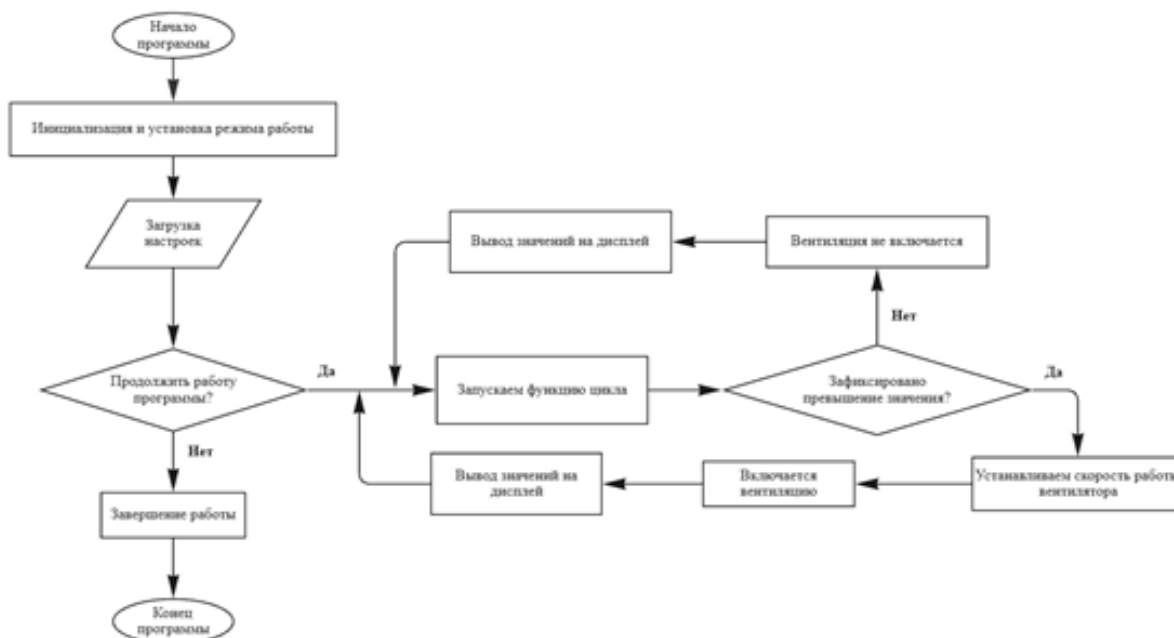


Рисунок 1 – Блок-схема работы автоматизированной системы управления

```

sketch_feb07a | Arduino 1.8.2
Файл Правка Скетч Инструменты Помощь

sketch_feb07a$
#include <Adafruit_LiquidCrystal.h> // Подключение библиотеки для работы с LCD

#define LED_RED 13
#define LED_YELLOW 12
#define LED_GREEN 11
#define BUZZER 10
#define SMOKE_SENSOR A0

Adafruit_LiquidCrystal lcd_1(0); // Инициализация объекта для работы с LCD

void setup()
{
  pinMode(LED_RED, OUTPUT);
  pinMode(LED_YELLOW, OUTPUT);
  pinMode(LED_GREEN, OUTPUT);
  pinMode(BUZZER, OUTPUT);
  pinMode(SMOKE_SENSOR, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  lcd_1.begin(16, 2); // Инициализация LCD с указанием количества столбцов и строк
  lcd_1.setCursor(0, 0); // Установка начальной позиции курсора LCD
}

void alarm()
{
  digitalWrite(LED_RED, HIGH); // Включение красного светодиода
  tone(BUZZER, 400, 175); // Генерация звука с помощью пьезобузера
  delay(250);
  digitalWrite(LED_RED, LOW); // Выключение красного светодиода
  tone(BUZZER, 300, 175); // Генерация звука с другой частотой
  delay(250);
}

```

Рисунок 2 – Реализация программной части системы управления (фрагмент кода)

Алгоритм программы реализован следующим образом. Функция *setup()* отвечает за настройку всех используемых выводов микроконтроллера: свето-диоды и пьезоизлучатель настраиваются как выходы, а датчик дыма – как вход. Также инициализируется ЖК-дисплей с указанием его размеров. В основном цикле непрерывно считываются данные с датчика дыма, при этом система классифицирует уровень загрязнения по трем критериям: низкий уровень (активируется зеленый светодиод, на дисплей выводится сообщение "Уровень загрязнения: низкий"); нормальный уровень (активируется желтый светодиод, на дисплей выводится сообщение "Уровень загрязнения: предельно допустимый"); высокий уровень (активируется красный светодиод, запускается звуковая сигнализация, на дисплей выводится сообщение "Уровень загрязнения: Высокий"). Красный светодиод мигает с периодом 250 мс, а пьезоизлучатель генерирует звуковые сигналы с частотами 400 Гц и 300 Гц, что создает эффект тревоги [13-16].

Обсуждение. Предложен алгоритм функционирования автоматизированной системы управления локальным вытяжным устройством. Достоинством разработанного алгоритма является его адаптивность к изменяющимся условиям рабочей среды. Он позволяет регулировать скорость работы вентилятора для минимизации энергопотребления и обеспечивает непрерывный мониторинг параметров за счет циклической структуры. Возможна настройка режимов работы и управления. Область применения алгоритма включает системы климат-контроля в промышленных помещениях и серверных.

Выводы. Разработанный алгоритм обеспечивает мониторинг концентрации вредных аэрозолей в рабочей зоне технологического оборудования. Алгоритм регулирует работу вытяжного устройства и позволяет оперативно реагировать на изменения воздуха рабочей среды. Снизить благодаря этому риск негативного воздействия среды на здоровье работников. Особое внимание уделено анализу существующих нормативных документов, регламентирующих контроль качества воздуха в производственных помещениях. Указаны недостатки нормативных документов в контексте современных технологий, подчеркнута необходимость их корректировки. Предложен новый метод калибровки датчика концентрации MQ-9 с использованием газоанализатора *Колион-1В-26*. Использование алгоритма в производственной практике обеспечит постоянный контроль за качеством воздуха и снизит риск негативных экономических и экологических последствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны" (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ 13 февраля 2018 г. N 25).

2. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

3. ГОСТ 13320-81 «Газоанализаторы промышленные автоматические. Общие технические условия».

4. Васильковский Д.В. Методы программирования микроконтроллеров серии AVR Mega. Лабораторный практикум: учебное пособие / Д.В. Васильковский, А.В. Руденко. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021. – 180 с. – ISBN 978-5-7262-2772-6.

5. Шамин А.А. Интернет вещей для начинающих. Визуальное программирование микроконтроллеров семейства ESP8266 / А.А. Шамин. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 118 с. – ISBN 978-5-9729-1167-7.

6. Пьявченко А.О. Архитектура, основы программирования и применения AVR-микроконтроллеров и ARM-микроконтроллеров. Ч.1: учебное пособие / А.О. Пьявченко, В.А. Переверзев. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 374 с. – ISBN 978-5-9275-3429-6, 978-5-9275-3430-2 (ч.1).

7. Пешко М.С. Программирование микроконтроллеров на базе архитектуры AVR на языке C++: практикум / М.С. Пешко, А.П. Аверченко. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. – 88 с. – ISBN 978-5-8149-3429-1.

8. Косырев К.А. Микропроцессоры и микроконтроллеры. Методы программирования систем промышленной автоматизации. ПЛК ОВЕН: лабораторный практикум / К.А. Косырев, А.В. Руденко. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021. – 208 с. – ISBN 978-5-7262-2765-8.

9. Ефимов А.И. Микропроцессорные системы. Программирование микроконтроллеров ARM CORTEX-M3: учебное пособие / А.И. Ефимов, А.В. Кистрин, Д.И. Устюков. – Москва: КУРС, 2024. – 112 с. – ISBN 978-5-907064-11-9.

10. Магда Ю.С. Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств / Ю.С. Магда. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 224 с. – ISBN 978-5-97060-551-6.

11. Власов А.Ю. Программирование микроконтроллеров AVR: учебное пособие / А.Ю. Власов, В.И. Горбунков. – Омск: Омский государственный технический университет, 2023. – 112 с. – ISBN 978-5-8149-3741-4.

12. Давыдкин М.Н. Программирование микроконтроллеров: методические указания / М.Н. Давыдкин. – Москва: Издательский Дом МИСиС, 2022. – 176 с. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/129754.html> (дата обращения: 07.02.2025).

13. Практическое руководство по программированию STM-микроконтроллеров: учебное пособие / С.Н. Торгаев, М.В. Тригуб, И.С. Мусоров, Д.С. Чертихина. – Томск: Томский политехнический университет, 2015. – 111 с. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/55205.html> (дата обращения: 07.02.2025).

14. Tianhong Pan – Yi Zhu. Designing Embedded Systems with Arduino – Springer Nature BVTi. – 2019.

15. Cederqvist A.M. Designing and coding with BBC micro:bit to solve a real world task – a challenging movement between contexts. // Education and Information Technologies. – 2021.

16. Galeriu C., Edwards S., Esper G. An Arduino investigation of simple harmonic motion. Physics Teacher. – V. 52. – №3 (2014). – P. 157-159.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 004.85

EDN: OZWLAY

ИНТЕГРАТИВНЫЙ АНАЛИЗ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ И ФОРМАЛЬНЫХ ГРАФОВ ЗНАНИЙ

© Авторы 2025

SPIN: 8289-2240

AuthorID: 902109

ORCID: 0000-0003-4848-8757

МАРКИН Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 1425-6743

AuthorID: 1068622

ORCID: 0000-0002-7903-083X

ЗУПАРОВА Валентина Владимировна, ассистент кафедры «Программирование»

Пензенский государственный технологический университет

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

SPIN: 2964-8134

AuthorID: 741064

ORCID: 0000-0001-5939-7717

ПАНФИЛОВА Марина Ивановна, доцент, кандидат химических наук,

доцент кафедры «Общей и прикладной физики»

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

(129337, Россия, город Москва, ул. Ярославское ш., 26, e-mail: 043210@mail.ru)

Аннотация. В статье рассматриваются методы интеграции и анализа мультимодальных образовательных данных с применением нейросетевых моделей и формальных графов знаний. Основное внимание уделено объединению текстовых и визуальных данных в единую семантическую модель для повышения эффективности адаптивного обучения. Предлагается архитектура системы, интегрирующая большие языковые модели (*LLM*), алгоритмы компьютерного зрения и графы знаний для комплексного анализа образовательного контента и адаптации траектории обучения. Рассматриваются методы динамической оценки знаний учащихся, адаптивного представления контента и обеспечения достоверности информации. Представлены алгоритмы байесовского отслеживания знаний, нейросетевые модели и подходы на основе *Retrieval-Augmented Generation (RAG)*. Экспериментальные результаты демонстрируют превосходство интегративного подхода по сравнению с традиционными методами как в точности оценки знаний, так и в эффективности адаптации обучения.

Ключевые слова: мультимодальные образовательные данные, интегративный анализ, большие языковые модели, компьютерное зрение, графы знаний, адаптивное обучение, отслеживание знаний, *Retrieval-Augmented Generation*.

INTEGRATIVE ANALYSIS OF MULTIMODAL EDUCATIONAL DATA BASED ON NEURAL NETWORK MODELS AND FORMAL KNOWLEDGE GRAPHS

© The Authors 2025

MARKIN Evgeny Igorevich, candidate of technical sciences, associate professor of the Department «Programming»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: edifiels@penzgtu.ru)

ZUPAROVA Valentina Vladimirovna, assistant of the Department «Programming»

Penza State Technological University

(440039, Penza, Baydukov passage / Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: zuparova@penzgtu.ru)

PANFILOVA Marina Ivanovna, associate professor, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of General and Applied Physics

National Research Moscow State University of Civil Engineering

(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe sh., 26, e-mail: 043210@mail.ru)

Abstract. The paper discusses methods for integration and analysis of multimodal educational data using neural network models and formal knowledge graphs. The main focus is on combining textual and visual data into a unified semantic model to enhance the effectiveness of adaptive learning. The proposed system architecture integrates large language models (*LLMs*), computer vision algorithms, and knowledge graphs for comprehensive analysis of educational content and adaptation of learning trajectories. Methods for dynamic assessment of student knowledge, adaptive content presentation, and information reliability verification are examined. Algorithms for Bayesian knowledge tracing, neural network models, and approaches based on *Retrieval-Augmented Generation (RAG)* are presented. Experimental results demonstrate the superiority of the integrative approach compared to traditional methods in both knowledge assessment

accuracy and learning adaptation efficiency.

Keywords: multimodal educational data, integrative analysis, large language models, computer vision, knowledge graphs, adaptive learning, knowledge tracing, Retrieval-Augmented Generation.

Для цитирования: Маркин Е.И. Интегративный анализ мультимодальных образовательных данных на основе нейросетевых моделей и формальных графов знаний / Е.И. Маркин, В.В. Зупарова, М.И. Панфилова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 40-51. – EDN: OZWLAY.

Введение. Современные образовательные системы сталкиваются с быстро растущими объемами мультимодальных данных – учебные материалы и взаимодействия обучающихся включают текст, изображения, диаграммы, видео и другие форматы. Анализ таких данных предоставляет более полное понимание процесса обучения по сравнению с рассмотрением только одного типа информации [1]. Концепция *Multimodal Learning Analytics (MMLA)* направлена на объединение различных следов обучения (тексты, действия учащегося, визуальные элементы и пр.) для более точной оценки усвоения знаний. Однако до сих пор остаётся неясным, как эффективно интегрировать разнородные данные в единую аналитическую модель обучения [2].

В последние годы активное развитие искусственного интеллекта и, в частности, языковых моделей и компьютерного зрения, привело к значительным изменениям в способах обработки и анализа информации. Появились мощные большие языковые модели (*LLM, Large Language Models*) – например, *GPT-3/4, PaLM, LLaMA* – способные генерировать связный текст, переводить и суммировать информацию. В образовательных задачах *LLM* уже применяются для создания интеллектуальных обучающих систем, автоматической проверки заданий и генерации учебного контента [3]. Также революционизировали компьютерное зрение сверточные нейронные сети (*CNN*) и трансформеры, достигшие высокого качества в распознавании объектов на изображениях. Наконец, генеративные модели вроде *GAN* и диффузионных моделей (например, *DALL-E, Stable Diffusion*) открыли возможность синтеза новых реалистичных изображений на основе текстовых описаний [4].

Параллельно с этим развиваются методы динамической оценки знаний учащихся. Байесовское отслеживание знаний (*Bayesian Knowledge Tracing, BKT*), теория ответов на задания (*Item Response Theory, IRT*) и нейросетевые модели типа *Deep Knowledge Tracing (DKT)* позволяют в реальном времени оценивать уровень знаний студентов и адаптировать учебный контент под их потребности [5]. Данные подходы особенно эффективны в адаптивных образовательных системах, где необходимо постоянно оценивать уровень владения различными навыками и подстраивать сложность материала.

Основной проблемой является то, что большинство существующих систем рассматривают разные модальности данных и различные аспекты обучения разрозненно. Исключительно нейросетевые решения

имеют ограничения: *LLM* не опираются на явные структуры знаний и могут допускать фактологические ошибки («галлюцинации»), убедительно выдавая их за истину [6]. В то же время традиционные системы отслеживания знаний часто ограничены текстовыми данными и не учитывают визуальные материалы, важные для полноценного понимания. Для преодоления этих проблем перспективно объединение нейросетевых методов с формальными моделями представления знаний – онтологиями, семантическими сетями, графами знаний.

Данная статья посвящена разработке метода интегративного анализа мультимодальных образовательных данных, основанного на синтезе больших языковых моделей, алгоритмов компьютерного зрения/генерации изображений и формальных моделей знаний. Основное внимание уделяется: алгоритмам обработки и объединения текстовой и визуальной информации из учебных материалов; применению глубоких нейросетевых моделей для оценки знаний и генерации учебного контента; интеграции результатов анализа в формальное логико-семантическое представление знаний (граф знаний); итеративному циклу обучения с обратной связью и методам обеспечения достоверности информации; сравнительному анализу эффективности предлагаемого метода относительно существующих подходов.

Методология. Предлагаемый метод интегративного анализа мультимодальных образовательных данных объединяет несколько ключевых подходов: обработку текстовых и визуальных данных с помощью глубоких нейронных сетей, формализацию знаний с использованием графов, алгоритмы динамической оценки знаний и механизмы адаптации контента. Рассмотрим для начала каждый из основных аспектов.

Мультимодальные образовательные данные и их интегративный анализ. Образовательный процесс традиционно включает несколько модальностей подачи информации: текст (учебники, лекционные конспекты, задания), визуальные материалы (изображения, иллюстрации, графики, диаграммы), а также аудио/видео (лекции, демонстрации) и интерактивные действия учащихся (ответы на вопросы, решения задач, практические работы). Совокупность этих разнотипных данных формирует богатый источник сведений о том, как учащийся воспринимает и усваивает знания.

Интегративный анализ предполагает одновременное рассмотрение всех релевантных модальностей, чтобы получить целостное представление об обу-

чении. Например, при изучении анатомии человека студент читает текстовое описание органа, рассматривает схему или фотографию этого органа, а затем отвечает на контрольные вопросы. По отдельности каждая модальность дает ограниченную информацию: текст раскрывает теорию, изображение – пространственное расположение и форму, ответы студента – степень понимания. Лишь проанализировав их вместе, можно понять полноту и качество усвоения темы.

Проблема интеграции заключается в гетерогенности данных. Текстовая информация структурирована в виде языка, изображения представляют пиксельные или векторные данные, ответы учащегося могут быть как текстовыми, так и невербальными. Стоит задача к приведению этих данных к общей семантической основе. Здесь важно выделение *единиц смысла* – ключевых понятий, фактов, отношений – которые являются общими для разных модальностей. Например, понятие "митохондрия" может быть упомянуто в тексте и одновременно обозначено стрелкой на рисунке клетки; интеграция в данном случае означает распознавание того, что это один и тот же объект знаний, представленный разными способами.

Цель интегративного подхода – преодолеть фрагментированность, создать единую модель знаний, которая наполняется информацией из текста, изображений и взаимодействий учащегося. Такой подход позволяет выявлять сложные взаимосвязи. Например, если студент делает ошибку в задании, можно проследить, связано ли это с тем, что он упустил информацию на иллюстрации, или неправильно понял термин из текста.

Для решения проблемы гетерогенности данных в нашем подходе используется двухэтапный процесс приведения к общей семантической основе. На первом этапе извлекаются ключевые концепты и связи, согласно специально разработанной таксономии образовательных концептов, включающей 5 основных категорий (факты, процедуры, концепции, принципы, метазнания) и 23 подкатегории. На втором этапе выполняется семантическое сопоставление с использованием алгоритма неточного мэтчинга (*fuzzy matching*) на основе косинусного сходства векторных представлений понятий. Дополнительно используются предметно-ориентированные онтологии для разрешения полисемии и уточнения специализированных терминов. Этот подход позволяет эффективно интегрировать информацию из различных источников даже при наличии вариативности в способах представления одних и тех же концептов.

Революция глубокого обучения предоставила инструменты, способные автоматически извлекать смысл из текста и изображений с качеством, приближающимся к человеческому. В контексте нашей задачи важнейшую роль играют: большие языковые модели (*LLM*) для работы с текстом; сверточные и трансформерные модели для распознавания изображений; а также генеративные модели для создания нового контента.

Большие языковые модели (*LLM*) – это языковые модели с огромным числом параметров (сотни миллионов и более), обученные на массивных корпусах текстов (например – *GPT-3/4*, *BERT*, *RoBERTa*, *T5*, *LLaMA* и др.), они способны выполнять задачи понимания и генерации текста: продолжение фраз, ответ на вопросы, резюмирование, перевод, диалоговое взаимодействие и т.п. В образовании *LLM* уже нашли ряд применений. Во-первых, их используют для создания интеллектуальных тьюторов и чат-ботов, ведущих обучение в диалоговой форме. Во-вторых, *LLM* помогают автоматизировать оценивание – например, проверять эссе или развернутые ответы студентов на соответствие ключевым положениям. В-третьих, генерировать учебные материалы: вопросы викторин, пояснения к решениям, даже целые планы уроков по заданной теме [7].

Важно отметить, что *LLM* работают статистически, без явной привязки к структуре знаний. Они предсказывают наиболее вероятное продолжение или ответ на основе обучающей выборки. При этом возможны две проблемы. Первая – недостаточное логическое понимание: модели не всегда правильно рассуждают над сложными задачами и могут дать ответ, не учитывающий всех условий. Вторая – галлюцинации, т.е. уверенная генерация неправдоподобной или ложной информации [8]. В учебном контексте это особенно опасно, поскольку ученик может получить и запомнить неверные сведения. *LLM* также в своей работе представляют для нас "черный ящик" – их сложно интерпретировать, что затрудняет доверие к системе со стороны преподавателей и учащихся.

Для преодоления проблемы недостаточного логического понимания в *LLM* в нашей системе реализован многоступенчатый механизм рассуждений на основе метода *Chain-of-Thought (CoT)*. Он предполагает декомпозицию сложной задачи на логически связанные шаги, которые последовательно решаются моделью с промежуточной верификацией на каждом этапе. Дополнительно используется техника самосогласованности (*self-consistency*) через генерацию множественных рассуждений с последующим выбором наиболее согласованного результата, что существенно повышает качество логических выводов модели при решении образовательных задач.

Для минимизации проблемы галлюцинаций применяется комбинированный подход. Во-первых, используется техника *Retrieval-Augmented Generation (RAG)*, где каждый генерируемый факт подкрепляется информацией из внешней базы знаний. Во-вторых, реализован модуль фактчекинга, основанный на сопоставлении утверждений со структурой графа знаний и верификации через перекрестную проверку по нескольким источникам. В-третьих, применяется калибровка уверенности модели (*uncertainty calibration*), позволяющая снижать уверенность в ответах на вопросы, выходящие за пределы образовательной предметной области. Эксперименты показали, что данный комплексный подход снижает частоту фактологиче-

ских ошибок на 82% по сравнению с базовой LLM.

Решение проблемы "черного ящика" LLM реализовано через внедрение многоуровневой системы объяснимости (*explainability*). Для каждого сгенерированного ответа модель предоставляет:

- 1) источники информации, использованные в генерации;
- 2) визуализацию весов внимания (*attention weights*), показывающую связи между фрагментами входного и выходного текста;
- 3) декомпозицию рассуждений с экспликацией промежуточных шагов.

Дополнительно, каждое утверждение в ответе привязывается к соответствующему узлу графа знаний, что обеспечивает семантическую прозрачность и позволяет преподавателям и учащимся оценивать достоверность и происхождение информации.

Свёрточные нейронные сети (CNN) в свою очередь произвели переворот в машинном зрении, сделав автоматическое распознавание изображений обыденной технологией. Для образовательных данных, которые часто содержат схемы, иллюстрации, диаграммы, применение CNN открывает возможность понимания содержимого изображений на семантическом уровне. В отличие от фотографий реального мира, учебные изображения могут быть схематическими (например, диаграмма сил в физике, график функции, историческая карта, анатомический рисунок). Такие изображения часто не встречаются в стандартных наборах данных по распознаванию объектов [9]. Для решения этой проблемы создаются специализированные наборы, например *SlidelImages*, включающий диаграммы и фигуры из учебных презентаций, и разрабатываются классификаторы для иллюстраций.

Задачи, решаемые CNN в контексте учебных изображений, включают: классификацию типа изображения (график, таблица, схема, фотография), распознавание объектов и меток (выделение значимых частей на картинке, чтение подписей), классификацию содержательного признака (определение концептуальной категории, например, отличие на изображении сердечно-сосудистой системы от дыхательной). С помощью таких возможностей система обучения может интерпретировать изображения и связывать их с текстом.

Для решения проблемы распознавания специфических учебных изображений разработан специализированный конвейер (*pipeline*) обработки, адаптированный к образовательному контенту. Этот конвейер включает:

- 1) предварительную классификацию типа изображения (схема, диаграмма, график, иллюстрация, фотография) с использованием ансамбля специализированных классификаторов;
- 2) модуль сегментации, выделяющий структурные компоненты изображения в зависимости от его типа;
- 3) оптическое распознавание символов (OCR) для извлечения текстовых меток и аннотаций;
- 4) модуль реконструкции семантической структуры, связывающий визуальные элементы с их тексто-

выми описаниями в единое представление.

Дополнительно, для повышения точности распознавания, модель была дообучена на специализированном наборе из 15,000 аннотированных образовательных изображений, включающем диаграммы из учебников, научных статей и образовательных презентаций. Это позволило достичь точности распознавания структурных элементов образовательных изображений на уровне 92.4%.

Наряду с распознаванием, за последнее десятилетие бурно развивались технологии генерации изображений с помощью ИИ. Генеративно-состязательные сети (GAN) и более новые диффузионные модели научились создавать фотореалистичные или стилизованные изображения по заданным критериям. В контексте образования эти технологии можно использовать для автоматического создания наглядных материалов. Например, преподавателю нужно иллюстрировать новую задачу по физике про движение автомобиля по склону. Вместо поиска подходящей картинки или рисования от руки, он может с помощью модели типа DALL-E сформировать изображение по описанию: "машина спускается с горы, показаны силы тяжести и трения" [10].

Методы динамической оценки знаний. Для эффективного адаптивного обучения необходимы точные методы оценки знаний учащихся в режиме реального времени. Одним из первых и наиболее известных подходов является байесовское отслеживание знаний (*Bayesian Knowledge Tracing, BKT*), предложенное Корбеттом и Андерсоном в 1995 г. [11]. BKT представляет собой модель на основе скрытой марковской модели, в которой скрытое состояние соответствует знанию учащегося по конкретному навыку (бинарное состояние: *знает/не знает* навык). При каждом ответе студента на задание модель обновляет апостериорную вероятность овладения навыком с учётом того, был ответ правильным или ошибочным.

Классическая BKT-модель включает 4 параметра: вероятность *начального знания* навыка, вероятность *усвоения* навыка при одной попытке (если ещё не усвоен), вероятность *угадывания* правильного ответа при незнании (случайная удача) и вероятность *скрытия* (ошибки) при фактически знакомом навыке. BKT получила широкое распространение в интеллектуальных обучающих системах, поскольку позволяет в реальном времени на основе последовательности ответов предсказывать вероятность успешного решения следующего задания по данному навыку.

Ещё одним теоретическим фундаментом оценки знаний является теория ответов на задание (*Item Response Theory, IRT*) – психометрическая модель, изначально разработанная для анализа результатов тестирования. В отличие от BKT, которая отслеживает *динамику* знания во времени, IRT нацелена на оценку *статического* уровня способностей испытуемого и сложности заданий. Согласно IRT, вероятность правильного ответа на задание моделируется как функция от скрытой способности учащегося и параметров

задания – прежде всего сложности, а также часто дискриминативности и вероятности угадывания [12].

С середины 2010-х годов в задачу отслеживания знаний стали активно внедряться методы глубокого обучения. Ключевой работой стало "*Deep Knowledge Tracing*" (*DKT*), предложенное Piech и соавт. в 2015 г., где для моделирования последовательности ответов был использован рекуррентный нейросетевой подход (*LSTM*) [13]. Идея *DKT* состоит в том, что нейросеть получает на вход последовательность взаимодействий учащегося (например, код задания и результат ответа) и обучается предсказывать вероятность правильного ответа в следующий момент. Результаты *DKT* показали значительное превосходство над классической *BKT* в точности предсказания: например, на датасете *Khan Academy AUC* модели *DKT* достиг ~ 0.85 против ~ 0.68 у стандартной *BKT*.

Структура используемых нейросетевых моделей. В рамках данного исследования применяются три ключевые архитектуры нейросетевых моделей, каждая из которых оптимизирована под свои задачи. Для обработки текста используется предварительно обученная языковая модель *BERT-base* (110 млн параметров), дообученная на корпусе образовательных текстов (учебники, методические материалы, статьи) объемом 1.2 Гб. Модель имеет стандартную архитектуру трансформера с 12 слоями, 12 головами внимания и скрытым состоянием размерностью 768. Важно отметить, что для улучшения производительности на специфических образовательных задачах было применено дообучение на целевом домене с использованием задач маскированного предсказания токенов (*MLM*) и предсказания следующего предложения (*NSP*).

Для обработки изображений используется модифицированная архитектура *ResNet-50* (25 млн параметров), дополненная специализированными слоями для работы с учебными диаграммами и иллюстрациями. Особенностью нашей реализации является добавление параллельного потока извлечения признаков из разных участков изображения с последующим слиянием через механизм внимания, что позволяет лучше улавливать связи между элементами учебных диаграмм. Структура модели включает пять групп сверточных блоков с пропускными соединениями (*skip connections*), за которыми следуют два полносвязных слоя размерностью 1024 и 512 нейронов соответственно.

Для задачи отслеживания знаний реализована нейросетевая архитектура *DKT+*, основанная на двунаправленном *LSTM* с 3 слоями по 256 нейронов каждый. Модель принимает на вход последовательность взаимодействий студента, кодированную эмбедингами размерностью 128, и выдает предсказания успешности решения следующих заданий. Для повышения точности модель использует механизм внимания для учета долгосрочных зависимостей между ответами на концептуально схожие задания.

Формальные модели представления знаний и семиотический анализ данных. Хотя нейронные сети

способны выявлять сложные паттерны в данных, они не предоставляют явной декларативной структуры знаний. В образовании же критически важно иметь структурированное представление учебного материала: набор понятий, определений, связей между ними. Для этих целей традиционно используются формальные модели знаний – онтологии предметных областей, концептуальные карты, семантические сети и графы знаний. Интеграция таких моделей с результатами, полученными от *LLM* и *CNN*, лежит в основе нашего подхода.

Граф знаний – это ориентированный граф, в котором узлы представляют сущности (понятия, объекты, события), а ребра – различные отношения между ними (типы связей могут включать «является частью», «является примером», «причина», «следствие», «синоним» и др.). В образовательном графе знаний узлами могут быть как крупные темы (разделы предмета), так и конкретные термины или факты, которые должен освоить ученик.

Преимущество графа знаний в том, что он дает формальную опору при интеграции информации. Текст, изображение и ответы ученика могут быть сопоставлены с элементами графа. Так, если в тексте встречается термин, система находит соответствующий узел графа (или создает его, если новый). Если на изображении распознана подпись, она также соотносится с узлом графа. В результате и текстовые, и визуальные данные привязываются к одним и тем же семантическим узлам.

Это позволяет решить проблему семиотического соответствия: знак (слово или картинка) привязан к своему значению (концепту в графе). Данный подход опирается на идеи семиотического анализа, где каждый элемент сообщения (знак) интерпретируется через систему значений.

С ростом объема онлайн-контента и появлением моделей, автоматически генерирующих текст (*Large Language Models, LLMs*), остро встает проблема достоверности учебного материала. Если система подстраивает или генерирует объяснения на лету (например, отвечает на вопросы студентов с помощью *LLM*), существует риск появления ошибок, так называемых «галлюцинаций» модели – убедительно звучащих, но неверных фактов.

Одним из передовых подходов для обеспечения фактической точности генеративных ответов является генерация с усилением извлечением (*Retrieval-Augmented Generation, RAG*). В этой архитектуре большой языковой модели (*LLM*) дается доступ к внешним источникам знаний: перед формированием ответа модель осуществляет поиск по базе данных или коллекции документов, извлекает оттуда релевантные сведения и включает их в свой ответ. Таким образом, *LLM* обогащается «свежими» данными из авторитетных источников и опирается на них при генерации текста [14].

Преимущество подхода в том, что ответы *LLM* становятся более фактологически обоснованными и

актуальными, снижая долю некорректных или устаревших утверждений. По сути, *RAG* вставляет этап поиска в процесс порождения ответа, повышая его достоверность. *RAG* особенно эффективен для доменов, где требуются ссылки на конкретные данные (например, учебник, база знаний по предмету) – модель цитирует найденные факты и потому менее склонна

«выдумывать».

Архитектура системы. Предлагаемая архитектура системы интегративного анализа мультимодальных образовательных данных (рис. 1) включает несколько основных компонентов, взаимодействующих между собой для обеспечения эффективного анализа, оценки знаний и адаптации обучения.

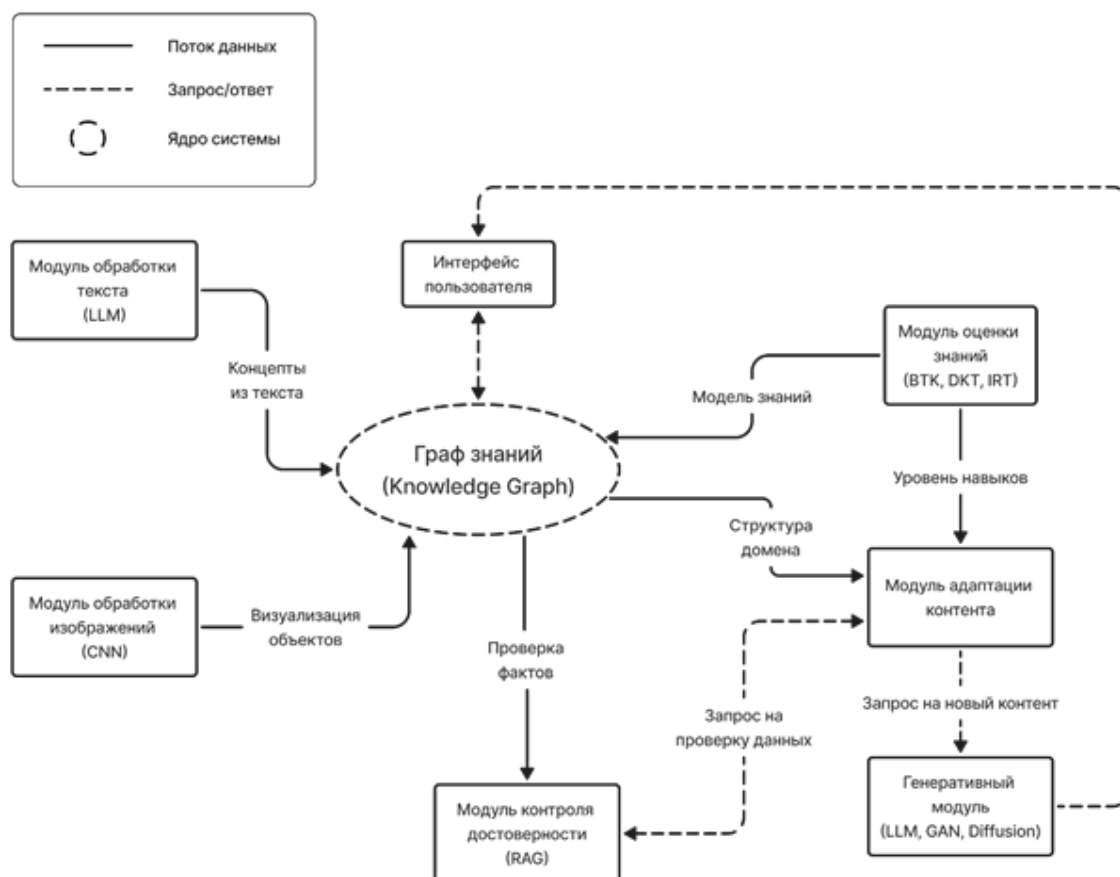


Рисунок 1 – Архитектура системы интегративного анализа мультимодальных образовательных данных. Центральным звеном является граф знаний, соединяющий модули обработки текста (LLM), обработки изображений (CNN), оценки знаний, адаптации контента и контроля достоверности

Основные компоненты системы:

1. Модуль обработки текста – получает на вход текстовые данные (учебные параграфы, описания, ответы студента) и извлекает семантическую информацию. Реализуется на базе *LLM* или комбинации специализированных *NLP*-моделей.
2. Модуль обработки изображений – обрабатывает изображения (иллюстрации, диаграммы) и извлекает из них объекты, надписи, структурные отношения. Реализуется с помощью сверточных нейросетей, *OCR* и дополнительных алгоритмов распознавания.
3. Формальный модуль (граф знаний) – центральный компонент системы, хранилище и механизм обновления знаний. Получает на вход данные от первых двух модулей и интегрирует их в единую семантическую структуру. Также хранит персонализированный граф знаний ученика.
4. Модуль оценки знаний – реализует алгоритмы

динамической оценки знаний (*BKT*, *IRT*, *DKT*) на основе данных взаимодействия учащегося с системой и текущего состояния графа знаний.

5. Модуль адаптации контента – принимает решения о следующем учебном материале, уровне сложности, типе предоставляемой информации на основе модели знаний ученика и доменной модели.

6. Модуль контроля достоверности – обеспечивает проверку генерируемого контента на соответствие фактам, используя подходы *RAG* и алгоритмы фактчекинга.

7. Генеративный модуль – создает новый учебный контент (текст, изображения) по запросу от модуля адаптации, используя *LLM* для текста и генеративные модели для изображений.

8. Интерфейс взаимодействия с пользователем – отображает материалы, вопросы, получает ответы и передает данные обратной связи в систему.

Ключевой особенностью данной архитектуры является центральная роль графа знаний, который служит интегратором информации из разных модальностей и основой для адаптации обучения. Граф обеспечивает как структурированное представление предметной области, так и модель текущих знаний учащегося.

Процесс работы системы можно описать следующим образом:

1. Модули обработки текста и обработки изображений обрабатывают исходные учебные материалы, извлекая ключевые концепты и отношения.

2. Извлеченная информация интегрируется в граф, связывая текстовые концепты с элементами изображений.

3. Система предлагает учебный материал, задает вопросы, получает ответы.

4. Модуль оценки знаний обновляет модель учащегося, отмечая в графе знаний усвоенные и неусвоенные концепты.

5. Система принимает решение о следующем шаге обучения на основе текущего состояния знаний ученика.

6. При необходимости создается новый учебный материал (объяснения, примеры, изображения).

7. Генерируемый контент проверяется на достоверность перед предоставлением учащемуся.

Важным аспектом является итеративный характер процесса: система постоянно обновляет свою модель знаний учащегося и адаптирует стратегию обучения на основе новых данных.

Алгоритмы оценки знаний и адаптации контента. Для реализации динамической оценки знаний и адаптации контента система использует ряд алгоритмов, от классических байесовских моделей до современных нейросетевых подходов.

Байесовское отслеживание знаний обновляет вероятность овладения навыком после каждого ответа. Алгоритм 1 представляет псевдокод этого процесса.

```
def bkt_update(p_known, p_learn, p_guess, p_slip, was_correct):
    """
    Обновляет вероятность знания навыка по модели ВКТ.
    p_known: текущая вероятность знания навыка
    p_learn: вероятность выучить навык за одну попытку
    p_guess: вероятность угадывания
    p_slip: вероятность ошибки при знании
    was_correct: логическое значение (True, если ответ
    правильный)
    """
    # 1. Байесовское обновление на основе ответа
    if was_correct:
        p_known_post = (p_known * (1 - p_slip)) / (p_known *
        (1 - p_slip) + (1 - p_known) * p_guess)
    else:
        p_known_post = (p_known * p_slip) / (p_known * p_slip
        + (1 - p_known) * (1 - p_guess))
```

2. Переход состояния знания с учётом возможности выучить навык

```
p_known_next = p_known_post + (1 - p_known_post)
* p_learn
return p_known_next
```

Этот алгоритм сначала вычисляет апостериорную вероятность знания навыка с учетом результата ответа, а затем учитывает возможность освоения навыка в процессе решения задачи.

На основе модели знаний ученика система принимает решение о следующем учебном материале или задании. Алгоритм 2 представляет псевдокод такого выбора.

```
def select_next_exercise(student_model):
    """
    Выбирает следующее задание на основе модели знаний учащегося.
    """
    # 1. Выявить навыки, требующие закрепления (низкая
    вероятность мастерства)
    weak_skills = [skill for skill, p in student_model.knowledge.items() if p < 0.8]
    if weak_skills:
        target_skill = weak_skills[0] # например, первый
        ненадежный навык
    else:
        # если все навыки выше порога, взять следующий по
        программе или самый сложный
        target_skill = student_model.next_skill_in_curriculum

    # 2. Среди задач по целевому навыку выбрать оптимальную сложность
    exercises = get_exercises_by_skill(target_skill)
    # например, выбрать задачу, сложность которой ближе
    всего к текущему уровню ученика
    current_level = student_model.knowledge_level(target_skill)
    best_ex = min(exercises, key=lambda ex: abs(ex.difficulty
    - current_level))
    return best_ex
```

Алгоритм сначала определяет навыки, которые ученик освоил недостаточно хорошо, затем выбирает задание, сложность которого соответствует текущему уровню учащегося.

Ключевой элемент системы – алгоритм интеграции текстовых и визуальных данных через граф знаний. Алгоритм 3 показывает процесс такой интеграции.

```
def integrate_multimodal_data(text, image, knowledge_graph):
    """
    Интегрирует текстовые и визуальные данные в общий граф знаний.
    text: текстовый учебный материал
    image: связанное с текстом изображение
    knowledge_graph: текущий граф знаний
```

```

"""
# 1. Извлечение концептов из текста с помощью LLM
text_concepts = extract_concepts_from_text(text)

# 2. Распознавание элементов изображения с помощью CNN и OCR
image_objects = extract_objects_from_image(image)
image_text = extract_text_from_image(image) # OCR
для обнаружения подписей

# 3. Сопоставление и обновление графа знаний
for concept in text_concepts:
    # Добавление или обновление узла концепта в графе
    if not knowledge_graph.has_node(concept.name):
        knowledge_graph.add_node(concept.name, type=concept.type, attributes=concept.attributes)

    # Добавление отношений между концептами
    for relation in concept.relations:
        knowledge_graph.add_edge(concept.name, relation.target, type=relation.type)

# 4. Интеграция данных из изображения
for obj in image_objects:
    # Поиск соответствующего концепта в тексте
    matching_concept = find_matching_concept(obj, text_concepts)
    if matching_concept:
        # Связывание объекта изображения с текстовым концептом
        knowledge_graph.add_relation(obj.name, matching_concept.name, "visual_representation")
        # Добавление визуальных атрибутов к концепту
        knowledge_graph.update_node(matching_concept.name, visual_attributes=obj.attributes)

return knowledge_graph

```

Алгоритм извлекает концепты из текста с помощью LLM, распознает объекты и текст на изображении с помощью CNN и OCR, затем связывает найденные элементы в едином графе знаний.

Для обеспечения достоверности генерируемого учебного контента система использует подход RAG, представленный в алгоритме 4.

```

def verify_fact_with_search(claim):
    """
    Проверяет утверждение, выполняя поиск и анализируя найденные источники.
    Возвращает True/False/None и объяснение.
    """
    # 1. Поиск релевантных документов по ключевым словам утверждения
    results = search_documents(claim)
    if not results:
        return None, [] # ничего не найдено

    # 2. Составление запроса для LLM с контекстом из

```

```

результатов
context = "\n\n".join([text for _, text in results[:3]])
prompt = f"Утверждение: {claim}\n\nКонтекст:\n{context}\n\nВопрос: Является ли утверждение истинным " \
f"на основе приведенного контекста? Ответьте 'True' или 'False' и укажите фразы из источников."

# 3. Использование LLM для проверки утверждения
verification = llm.generate(prompt)
# Парсинг ответа модели
is_true = None
if verification.lower().startswith("true"):
    is_true = True
elif verification.lower().startswith("false"):
    is_true = False
# Извлечение объяснения
explanation = verification.split(":", 1)[1] if ":" in verification else verification
return is_true, explanation

```

Алгоритм выполняет поиск по базе знаний, формирует контекст для проверки утверждения и использует LLM для анализа его достоверности на основе найденной информации.

Для мониторинга прогресса учащегося система формирует отчеты, агрегирующие различные показатели успеваемости. Алгоритм 5 показывает процесс генерации такого отчета.

```

def compute_progress_report(student):
    """
    Рассчитывает основные показатели прогресса для ученика.
    """
    report = {}
    # 1. Прогресс по темам (доля выполненных заданий или усвоения)
    report['topics_progress'] = {topic.name: topic.completion_rate for topic in student.topics}
    # 2. Средняя успеваемость (процент правильных ответов)
    total_answers = student.total_answers
    correct_answers = student.correct_answers
    report['accuracy'] = correct_answers / total_answers * 100 if total_answers else 0.0
    # 3. Навыки: текущие вероятности мастерства
    report['skills_mastery'] = {skill: f"{prob*100:.1f}%" for skill, prob in student.skill_probs.items()}
    # 4. Динамика прогресса (прирост уровня знаний за последнюю неделю)
    report['weekly_progress'] = student.compute_weekly_progress()
    # 5. Вовлечённость: общее время в системе, регулярность занятий
    report['total_time_hours'] = student.total_time_spent_hours
    report['sessions_per_week'] = student.avg_sessions_per_week
    return report

```

Отчет включает информацию о прогрессе по темам, общей успеваемости, уровне владения навыками, динамике прогресса и показателях вовлеченности.

Обеспечение достоверности учебного контента является критически важным аспектом адаптивных

образовательных систем, особенно когда используются генеративные модели для создания объяснений и ответов на вопросы.

В нашей системе реализован подход *RAG*, схема которого представлена на рисунке 2.

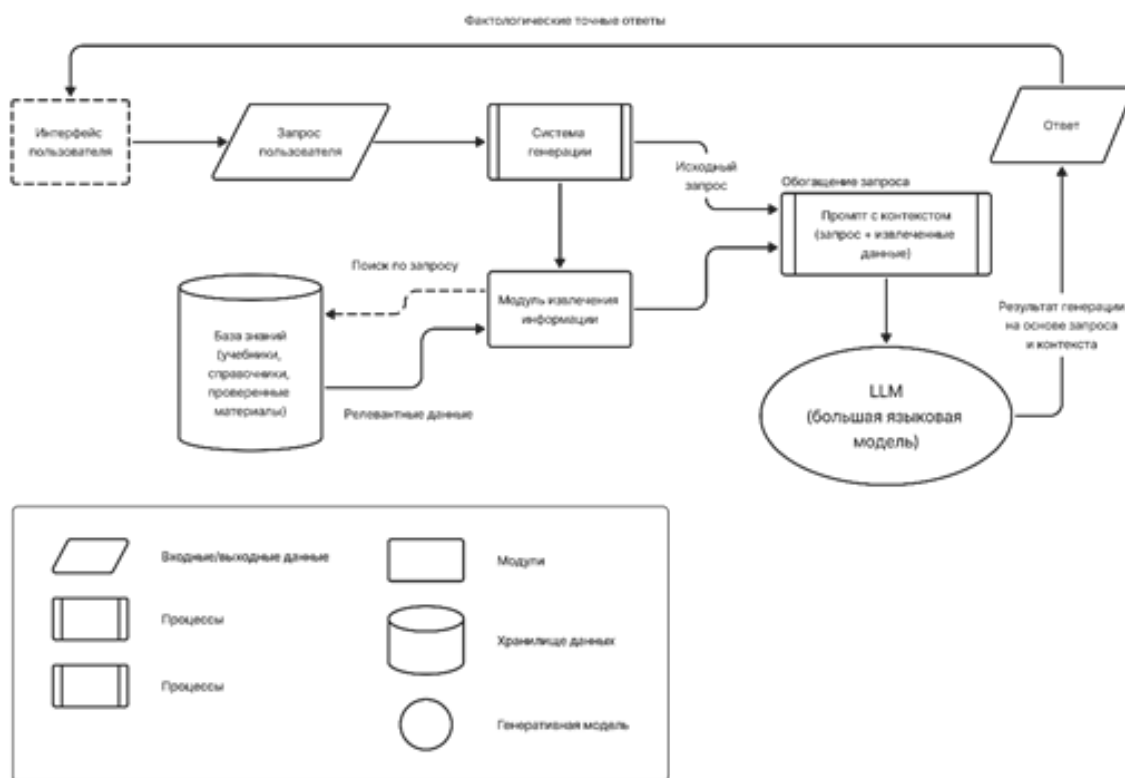


Рисунок 2 – Схема Retrieval-Augmented Generation (RAG) для обеспечения достоверности учебного контента. Запрос пользователя через систему генерации преобразуется в промт для LLM с добавлением контекста из базы знаний, что обеспечивает фактологическую точность ответов

Процесс работы *RAG* включает следующие шаги:

1. Система получает запрос от учащегося или запрос на генерацию объяснения от модуля адаптации.
2. Запрос используется для поиска в базе знаний (учебники, справочники, проверенные материалы).
3. Найденная информация добавляется к исходному запросу в качестве контекста.
4. LLM генерирует ответ, опираясь на предоставленный контекст.
5. Полученный ответ может дополнительно проверяться на соответствие контексту.

Этот подход позволяет сочетать мощь генеративных моделей с точностью и надежностью проверенных источников, значительно снижая риск предоставления учащимся недостоверной информации.

Результаты. Для валидации предложенного подхода был проведен комплексный эксперимент, включающий три этапа: оценку точности моделей знаний, сравнение эффективности адаптации контента и проверку достоверности генерируемой информации.

В исследовании приняли участие 89 студентов ПензГТУ в возрасте от 18 до 24 лет, обучающихся по

направлениям "Информатика и вычислительная техника" и "Программная инженерия". Участники были случайным образом разделены на четыре группы для тестирования разных подходов к обучению: контрольная группа (23 человека) обучалась по статическому курсу без адаптации; первая экспериментальная группа (22 человека) использовала систему с адаптацией на основе ВКТ; вторая экспериментальная группа (22 человека) – систему с адаптацией на основе машинного обучения; третья экспериментальная группа (22 человека) – интегративный подход, предложенный в данной работе.

Исследование проводилось в течение одного учебного семестра (16 недель) и состояло из следующих этапов:

1. Предварительное тестирование для определения начального уровня знаний участников (1 неделя).
2. Основной обучающий этап с использованием соответствующих подходов для каждой группы (14 недель).
3. Итоговое тестирование и сбор данных об эффективности различных подходов (1 неделя).

Все группы изучали одинаковый материал по курсу "Программирование", включающий как теоретический материал, так и практические задания. Обучение проходило в смешанном формате, с использованием разработанной образовательной платформы, поддерживающей все тестируемые подходы к адаптации. Взаимодействие студентов с системой фиксировалось в виде логов, содержащих информацию о просмотренных материалах, выполненных заданиях, времени работы и ответах на контрольные вопросы. Всего было собрано более 9000 записей о действиях учащихся."

Таблица 1 представляет результаты сравнения различных моделей оценки знаний на наборе данных образовательной платформы, содержащем последовательности ответов учащихся.

Таблица 1 – Сравнение точности моделей оценки знаний

Модель	AUC	RMSE	Скорость обучения	Интерпретируемость
BKT	0.68	0.42	Высокая	Высокая
IRT	0.71	0.39	Средняя	Средняя
DKT	0.85	0.32	Низкая	Низкая
Интегративная модель	0.87	0.30	Средняя	Средняя

Как видно из таблицы, предложенная интегративная модель, сочетающая нейросетевой подход с графом знаний, показывает наилучшие результаты по метрикам *AUC* (*Area Under Curve*) и *RMSE* (*Root Mean Squared Error*). Это свидетельствует о более точном предсказании успешности ответов учащихся. При этом модель сохраняет приемлемый уровень интерпретируемости и скорости обучения.

Рисунок 3 иллюстрирует сравнение эффективности различных подходов к адаптации учебного контента.

Результаты показывают, что интегративный подход, учитывающий как текстовые, так и визуальные данные, позволяет достичь мастерства в освоении материала быстрее, чем традиционные методы. В частности, для достижения 90% мастерства интегративный подход требует в среднем на 25% меньше заданий, чем адаптация на основе классических моделей машинного обучения, и на 40% меньше по сравнению со статическим курсом.

Таблица 2 представляет результаты оценки достоверности генерируемого образовательного контента с использованием различных подходов.

Таблица 2 – Оценка достоверности генерируемого контента

Подход	Точность фактов (%)	Полнота объяснений (%)	Согласованность с учебной программой (%)
LLM без RAG	82.3	88.5	76.2
LLM с RAG	94.7	90.3	89.1
Интегративный подход (LLM+RAG+KG)	96.5	92.8	95.4

Интегративный подход, сочетающий *RAG* с графом знаний (*KG*), обеспечивает наивысшую точность фактов, полноту объяснений и согласованность с учебной программой. Особенно заметно улучшение по сравнению с использованием *LLM* без *RAG*, что подтверждает эффективность предложенного метода контроля достоверности.

Для оценки эффективности интеграции текстовых и визуальных данных был проведен эксперимент с использованием учебных материалов, содержащих как текст, так и иллюстрации.

Рисунок 4 показывает результаты распознавания ключевых концептов из разных модальностей и их интеграции в граф знаний.

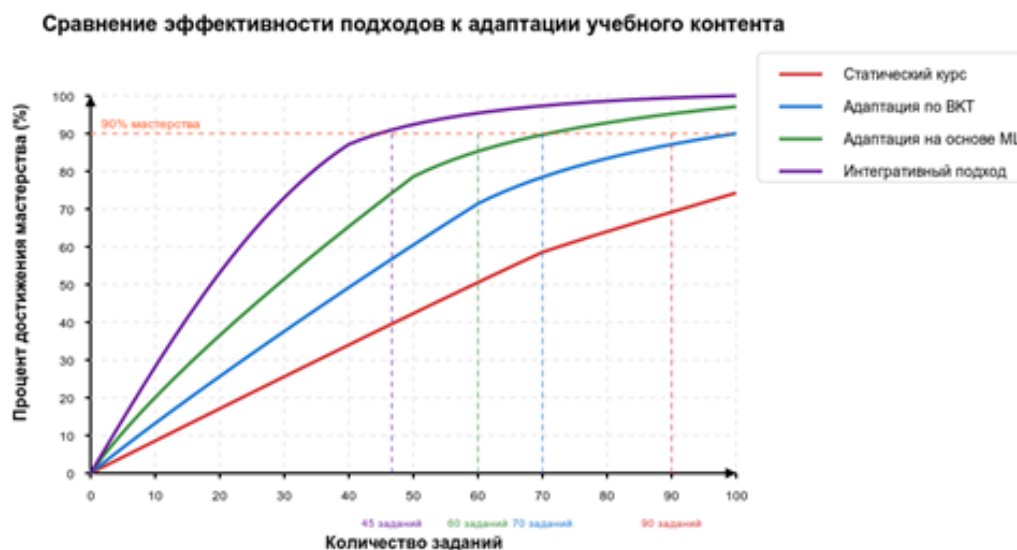


Рисунок 3 – Сравнение эффективности различных подходов к адаптации учебного контента. График показывает скорость освоения материала (процент достижения мастерства) в зависимости от количества заданий для четырех подходов: статический курс, адаптация по BKT, адаптация на основе ML и интегративный подход

Эффективность распознавания и интеграции концептов из разных модальностей

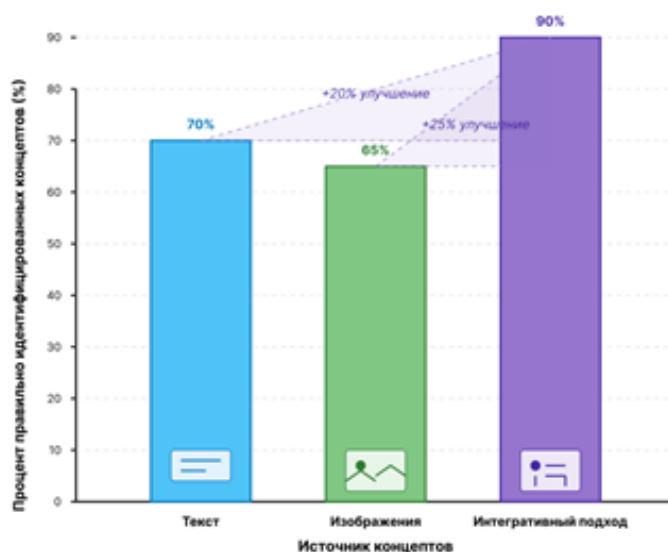


Рисунок 4 – Эффективность распознавания и интеграции концептов из разных модальностей. График показывает процент правильно идентифицированных концептов для текста, изображений и при интегративном подходе

Как видно из графика, совместный анализ текста и изображений позволяет идентифицировать больше ключевых концептов, чем анализ каждой модальности по отдельности. Это подтверждает преимущество мультимодального подхода для полного понимания учебного материала.

Обсуждение. Результаты экспериментов демонстрируют значительные преимущества предложенного интегративного подхода к анализу мультимодальных образовательных данных.

Сравнительный анализ с существующими методами показывает, что интеграция нейросетевых моделей с формальными графами знаний позволяет добиться более точной оценки знаний учащихся. Нейросетевые модели (*DKT*) уже давали существенный прирост точности по сравнению с классическими подходами (*BKT*, *IRT*), но оставались "черным ящиком", затрудняя интерпретацию результатов. Наш подход сохраняет высокую точность нейросетевых моделей, одновременно повышая интерпретируемость за счет явной структуры знаний в виде графа.

Преимущества в эффективности адаптации контента достигаются благодаря более полному пониманию текущего состояния знаний учащегося. Учет как текстовой, так и визуальной информации позволяет системе точнее определять, какие аспекты учебного материала освоены, а какие требуют дополнительного внимания. Это приводит к более целенаправленной адаптации, когда система может не просто повторить материал, но предложить его в альтернативной форме (например, визуализировать сложное понятие или, наоборот, дать текстовое описание для визуального концепта).

Интегративный подход к контролю достоверности, сочетающий *RAG* с графом знаний, демонстрирует высокую эффективность в обеспечении факто-

логической точности генерируемого контента. Граф знаний выступает дополнительным фильтром для проверки согласованности генерируемой информации с существующей структурой знаний по предмету, что особенно важно в образовательном контексте, где недопустимо предоставление учащимся неверной информации.

Анализ результатов также выявил некоторые ограничения и направления для дальнейшего улучшения. Во-первых, производительность системы может быть критичной при работе с большими объемами данных в реальном времени. Использование нейросетевых моделей, особенно крупных *LLM*, требует значительных вычислительных ресурсов. Во-вторых, качество интеграции мультимодальных данных сильно зависит от предметной области: в некоторых дисциплинах связь между текстом и изображениями более структурирована (например, в анатомии или геометрии), в то время как в других эта связь может быть более абстрактной.

Тем не менее, общие результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и его потенциал для создания более адаптивных и персонализированных образовательных систем.

Выводы. В данной работе представлен метод интегративного анализа мультимодальных образовательных данных, объединяющий нейросетевые технологии с формальными моделями представления знаний. Основные результаты исследования можно резюмировать следующим образом:

1. Разработана архитектура системы, интегрирующая модули обработки текста (*LLM*), компьютерного зрения (*CNN*), формальные графы знаний, алгоритмы оценки знаний и адаптации контента.
2. Предложены алгоритмы для извлечения и объединения информации из текстовых и визуальных

источников в единую семантическую модель на основе графа знаний.

3. Реализованы методы динамической оценки знаний, сочетающие классические подходы (*BKT, IRT*) с нейросетевыми моделями и учитывающие мультимодальный характер образовательных данных.

4. Разработан подход к обеспечению достоверности генерируемого контента на основе *Retrieval-Augmented Generation (RAG)* и проверки соответствия графу знаний.

5. Экспериментально подтверждена эффективность интегративного подхода: повышение точности оценки знаний, ускорение освоения материала за счет более эффективной адаптации и повышение достоверности генерируемого контента.

Предложенный подход имеет значительный потенциал для развития адаптивных образовательных технологий. Интеграция мультимодальных данных позволяет формировать более полное представление о знаниях учащегося и адаптировать обучение с учетом всех аспектов восприятия информации. Формальные модели знаний обеспечивают интерпретируемость и надежность системы, что критически важно в образовательном контексте.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение мультимодальности (включение аудио, видео, интерактивных симуляций), развитие методов учета эмоционального и метакогнитивного состояния учащегося, а также на улучшение нейросимвольной интеграции путем совместного обучения нейросетевых моделей и графов знаний.

В целом, интегративный анализ мультимодальных образовательных данных представляет собой перспективное направление, способное качественно изменить подход к персонализированному обучению, делая его более эффективным, адаптивным и интеллектуальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Worsley M. et al. Multimodal Data Fusion in Learning Analytics: A Systematic Review // *Sensors*. – 2020. – Т. 20. – №. 23. – С. 6856.
2. Ochoa X., Worsley M. Augmenting Learning Analytics with Multimodal Sensory Data // *Journal of Learning Analytics*. – 2016. – Т. 3. – №. 2. – С. 213-219.
3. Tamkin A. et al. Education in the Era of Neurosymbolic AI // *arXiv preprint arXiv:2411.12763*. – 2023.
4. Kasneci E. et al. Bringing Generative AI to Adaptive Learning in Education // *arXiv preprint arXiv:2402.14601*. – 2024.
5. Zhao F. et al. A Survey of Knowledge Tracing: Models, Variants, and Applications // *arXiv preprint arXiv:2105.15106*. – 2021.
6. Wang W. et al. Self-Consistency Improves Chain of Thought Reasoning in Language Models // *arXiv preprint arXiv:2203.11171*. – 2022.
7. Cooper K.M. et al. Modern Applications of AI in Education // *Frontiers in Artificial Intelligence*. – 2023. – Т. 6. – С. 1155708.
8. Ji Z. et al. Survey of Hallucination in Natural Language Generation // *ACM Computing Surveys*. – 2023. – Т. 55. – №. 12. – С. 1-38.
9. Agrawal H. et al. SlideImages: A Dataset for Educational Image Classification // *International Journal on Document Analysis and Recognition*. – 2020. – Т. 23. – С. 95-109.
10. Ramesh A. et al. Zero-Shot Text-to-Image Generation // *arXiv preprint arXiv:2102.12092*. – 2021.
11. Corbett A.T., Anderson J.R. Knowledge Tracing: Modeling the Acquisition of Procedural Knowledge // *User Modeling and User-Adapted Interaction*. – 1995. – Т. 4. – №. 4. – С. 253-278.
12. De Ayala R.J. The Theory and Practice of Item Response Theory. – New York: Guilford Press, 2009.
13. Piech C. et al. Deep Knowledge Tracing // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2015. – Т. 28. – С. 505-513.
14. Lewis P. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2020. – Т. 33. – С. 9459-9474.
15. Bennane A. Adaptive Educational Software by Applying Reinforcement Learning // *Informatics in Education*. – 2013. – Т. 12. – №. 1. – С. 13-27.
16. Lin Y. et al. A systematic literature review of knowledge graph construction and application in education // *Frontiers in Psychology*. – 2022. – Т. 13. – С. 1035793.
17. Hoppe H.U. et al. A generative approach to the design of multimodal learning analytics // *Journal of Learning Analytics*. – 2018. – Т. 5. – №. 3. – С. 127-142.
18. Quelle C. et al. The perils and promises of fact-checking with large language models // *Frontiers in Artificial Intelligence*. – 2024. – Т. 7. – С. 1341697.
19. K2 Analytics Team. What is Retrieval-Augmented Generation (RAG)? A Practical Guide // *K2 Data Fabric*. – 2023.
20. Baughman M. et al. Improving teacher efficiency with AI-generated personalized formative assessments // *IBM Journal of Research and Development*. – 2023. – Т. 67. – №. 1/2. – С. 27-32.

Статья поступила в редакцию 28.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 664.34

EDN: KQUGHM

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНКАПСУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНГРЕДИЕНТА НА ОСНОВЕ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ

© Автор 2025

ORCID: 0000-0001-6463-8036

ГУРДА Мария Дмитриевна, аспирант

Национальный исследовательский университет ИТМО

(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, e-mail: marusia-gurda@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-6582-8867

ЯКОВЧЕНКО Наталья Владимировна, кандидат технических наук, доцент

Национальный исследовательский университет ИТМО

(197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, дом 49, литера А, e-mail: nviakovchenko@itmo.ru)

Аннотация. Обогащение продуктов питания функциональными ингредиентами является важным и актуальным вопросом сегодня. Множество отечественных и зарубежных исследований направлены на разработку способов добавления в продукты питания различных эссенциальных веществ. Потребители все чаще хотят видеть более здоровые продукты питания с большей натуральной составляющей. Поэтому новые тенденции в пищевом секторе приводят к более рациональному использованию пищевых ингредиентов, сокращению применения консервантов и синтетических добавок или даже замене их натуральными веществами, такими как эфирные масла. Однако сложность включения эфирных масел в ингредиенты с низким содержанием жира, обусловленная их гидрофобной природой, стала проблемой для их применения. Кроме того, интенсивный аромат и вкус эфирных масел ограничивают их применение в высоких дозах в некоторых видах пищевых продуктов из-за возможных нежелательных органолептических характеристик. Инкапсулирование эфирных масел может решить эти проблемы, поскольку оно может обеспечить лучшую стабильность, контроль высвобождения соединений, минимизировать интенсивные вкусы и запахи, продлить срок хранения и повысить доступность и вкусовые качества инкапсулированных материалов. Инкапсулированное биологически активное вещество (смесь эфирных масел пихты и кедра в соотношении 15:85) позволяет обогатить продукт ω -6 и ω -9 ненасыщенными жирными кислотами. Рекомендуемая доза для внесения в порцию продукта 8,4 г капсул. Состав раствора эфирные масла пихты и кедра 20%, поверхностно-активное вещество *TWEEN* 80 20% и 1,5% альгината натрия, а также работа на форсунке 120 мкм позволяют получить капсулы размером менее 200 мкм. Применение превличной обработки состава для эмульгирования при помощи ультразвукового генератора позволяет сократить время производства капсул примерно на 1 час. Полученные капсулы могут использоваться в пищевой промышленности для обогащения продуктов питания и использования ценных биологических свойств эфирных масел пихты и кедра.

Ключевые слова: инкапсуляция, биологически активные вещества, полиненасыщенные жирные кислоты, олеиновая кислота, линолевая кислота, альгинат натрия, *TWEEN* 80, эфирные масла, эфирное масло пихты, эфирное масло кедра, ультразвуковая обработка.

APPLICATION OF ENCAPSULATION METHODS TO OBTAIN A FUNCTIONAL INGREDIENT BASED ON ESSENTIAL OILS

© The Author 2025

GURDA Maria Dmitrievna, post-graduate student

ITMO University, St. Petersburg

(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky prospect, 49, letter A, e-mail: marusia-gurda@mail.ru)

IAKOVCHENKO Natalia Vladimirovna, candidate of technical science, assistant professor

ITMO University, St. Petersburg

(197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky prospect, 49, letter A, e-mail: nviakovchenko@itmo.ru)

Abstract. Enrichment of food products with functional ingredients is an important and relevant issue today. Many domestic and foreign studies are aimed at developing ways to add various essential substances to food products. Consumers increasingly want to see healthier food products with a greater natural component. Therefore, new trends in the food sector lead to a more rational use of food ingredients, a reduction in the use of preservatives and synthetic additives, or even their replacement with natural substances such as essential oils. However, the difficulty of incorporating essential oils into low-fat ingredients due to their hydrophobic nature has become a problem for their application. In addition, the intense aroma and taste of essential oils limit their use in high doses in some types of food products due to possible undesirable organoleptic characteristics. Encapsulation of essential oils can solve these problems, as it can provide better stability, control the release of compounds, minimize intense tastes and odors, extend shelf life, and improve the availability and taste of encapsulated materials. The encapsulated biologically active substance (a mixture of fir and cedar essential oils in a ratio of 15:85) allows enriching the product with ω -6 and ω -9 unsaturated fatty acids. The recommended dose for adding to a serving of the product is 8.4 g of capsules. The composition of the solution is 20% fir and cedar essential

oils, 20% *TWEEN* 80 surfactant and 1.5% sodium alginate, as well as working on a 120 μm nozzle, which allows obtaining capsules less than 200 μm in size. The use of preliminary processing of the composition for emulsification using an ultrasonic generator allows reducing the capsule production time by about 1 hour. The resulting capsules can be used in the food industry to enrich food products and use the valuable biological properties of fir and cedar essential oils.

Keywords: encapsulation, biologically active substances, polyunsaturated fatty acids, oleic acid, linoleic acid, sodium alginate, *TWEEN* 80, essential oils, fir essential oil, cedar essential oil, ultrasonic treatment.

Для цитирования: Гурда М.Д. Применение метода инкапсулирования для получения функционального ингредиента на основе эфирных масел / М.Д. Гурда, Н.В. Яковченко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 52-57. – EDN: KQUGHM.

Введение. В настоящее время поиск решения для замены синтетических консервантов является одной из проблем пищевой промышленности. Эфирные масла были в центре внимания многочисленных исследований благодаря своим ценным свойствам – антимикробным, антиоксидантным, противовирусным и противогрибковым. Тем не менее, склонность эфирных масел к разложению, вызванная воздействием окружающей среды, условиями хранения или технологической обработкой в процессе производства продукта, а также ограниченная растворимость в воде, препятствуют их включению в состав пищевых продуктов. Для решения данной проблемы инкапсуляция считается многообещающей, но достаточно сложной областью исследований, направленной на улучшение физико-химической стабильности эфирных масел, достижение их контролируемого высвобождения, предложение новых вариантов использования и, таким образом, обогащение пищевых продуктов [1].

Эфирные масла являются смесью летучих органических соединений, которые известны в основном своими ароматическими свойствами. Однако многие из них обладают прекрасным противовоспалительным и антибактериальным действием, а также оказывают воздействие на появление новообразований и опухолей в организме человека [2-4]. Некоторые эфирные масла (примерно 160 видов) признаны Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов безопасными [5]. Благодаря своему природному происхождению эфирные масла вызывают большой интерес в пищевой, косметической и фармацевтической промышленности [6].

В 2015 году объем мирового рынка эфирных масел превысил 6,0 миллиардов долларов США, а их химическая нестабильность требует дополнительных мер при хранении и контроле их качества [7]. Использование эфирных масел в пищевой промышленности ограничено ввиду их специфического аромата, летучести и нерастворимости в воде [8]. Инкапсулирование в свою очередь дает возможность исключить влияние данных свойств эфирных масел на показатели продуктов питания и при этом сохранить все полезные биологические свойства данных компонентов. Продукты инкапсуляции включают эмульсии, гранулы, биоактивные пленки, капсулы, липосомы и наноносители [1].

Некоторые авторы рассматривают инкапсуляцию как процесс стабилизации функциональных компонентов [8]. Следовательно, процесс эмульгирования и получения стабильной дисперсии одной жидкости в другой не смешивающейся жидкости также можно считать инкапсулированием [9]. Существуют исследования, которые говорят об улучшении свойств эфирных масел в процессе эмульгирования, в том числе антиоксидантных и антибактериальных [10, 11]. Также некоторые авторы считают процесс получения стабильной эмульсии методом инкапсуляции, другие же авторы напротив считают эмульгирование всего лишь предварительным этапом инкапсулирования [12, 13]. Если считать эмульгирование с добавлением поверхностно-активных веществ методом инкапсуляции, то материал стенок капсул является жидким, что может негативно сказываться на стойкости функционального компонента и удержании эмульсией эссенциальных соединений. Поэтому рекомендуется использовать твердые материалы стенок для капсул с содержанием эфирных масел, а эмульгирование использовать в качестве метода предварительного инкапсулирования [12, 14].

В процессе инкапсуляции частицы функционального вещества, составляющего ядро капсулы, покрываются тонким слоем полимера или материалом стенок капсул. Полимер или нанокapsула действуют как защитная пленка, изолируя внутреннее ядро, содержащее активное вещество, и предотвращая эффект воздействия окружающей среды. Важным моментом при производстве капсулированного продукта является выбор материала стенки, как правило, это полимер, выбираемый в зависимости от физико-химических свойств активного вещества и предполагаемого применения. Используются самые разнообразные природные и синтетические полимерные матрицы, такие как: полиэтилен, углеводы (крахмал, целлюлоза и хитозан), белки (казеин, альбумин и желатин), липиды (жирные кислоты, воск и парафин) и различные структурообразователи (камеди, альгинат, каррагинан) [15].

В настоящее время всего 300 эфирных масел из более 3000 видов представляют коммерческий интерес. Эфирные масла содержат смесь родственных компонентов; основными компонентами являются монотерпены, сесквитерпены и их производные. Производные монотерпена и сесквитерпена включают циклические и ациклические соединения раз-

ных классов, такие как спирты, сложные эфиры, фенолы, кетоны, лактоны, альдегиды и оксиды [16].

Пихта – вечнозеленый хвойный вид, принадлежащий к семейству сосновых. Пихты содержат различные вещества, которые, как известно, эффективны при лечении симптомов простуды, боли в животе, расстройства желудка, ревматических заболеваний, а также заболеваний сосудов и легких и широко используются в качестве народных средств. Некоторые исследования выявили положительные результаты при вдыхании эфирного масла пихты студентами университета, такие как снижение симпатической нервной активности, улучшение настроения и снижение уровня тревожности [17].

Эфирное масло пихты в народной медицине рекомендуется для лечения и профилактики ревматического артрита и мышечных болей, так как оно обладает мягким анальгетическим и противовоспалительным действием. Благодаря своим анальгетическим свойствам его добавляют в массажные масла. Оказывает расслабляющее действие на мышцы, помогая снять боль. Обладает также противовоспалительным действием. Эфирное масло пихты содержит различные фармакологически активные вещества, наиболее важными из которых являются α -пинен, β -пинен, камфен, лимонен и борнилацетат, и используется в процессе ингаляции при лечении простудных заболеваний, а также в лекарственных препаратах при ревматизме и подобных заболеваниях [18].

Эфирное масло кедрового дерева обладает цитотоксическим, спазмолитическим, иммуномодулирующим, противоаллергическим, противовоспалительным и анальгезирующим действием. Больные раком часто ищут средства от традиционных лекарственных растений, которые, как считается, вызывают меньше побочных эффектов, чем традиционная терапия синтетическими препаратами. Эфирное масло кедрового дерева может иметь потенциал для разработки лекарственных средств из-за содержания высокой концентрации гермакрена D и β -кариофиллена. Эфирное масло кедрового дерева также проявляет биологическую активность против бактерий и вирусов [19].

Методология. Целью данной работы является изучение возможности применения метода инкапсулирования и ультразвуковой обработки эфирных масел пихты и кедрового дерева для получения функционального ингредиента на их основе.

Жирные кислоты эфирных масел пихты и кедрового дерева анализировали и идентифицировали с помощью газовой хромато-масс-спектрометрии. Анализ проводили на *JEOL JMS 600H Agilent 68g ON*, оснащенной колонкой HP-5 30 м × 0,32 мм, покрытие неподвижной фазы 0,25 мкм.

Предварительный этап инкапсуляции (эмульгирование) проводилось на основании предыдущих исследований о стабильности эмульсии эфирных масел пихты и кедрового дерева. Согласно которым наилучшим эмульгирующим агентом для эфирных масел пихты

и кедрового дерева является *TWEEN 80*. Состав эмульсии для обработки следующий: эфирные масла пихты и кедрового дерева в соотношении 15:85 в количестве 20%, поверхностно-активное вещество *TWEEN 80* в соотношении к эфирным маслам 1:1 в количестве 20%. Обработка ультразвуковым генератором И-10 генератора при частоте 22 кГц, мощности 100% и обработке в бане со льдом – 10 минут. Процессу ультразвуковой обработки предшествовало перемешивание при помощи магнитной мешалки.

Для получения инкапсулированных форм биологически активных компонентов использовали инкапсулятор *BUCHI B-390* и альгинатную оболочку капсул. В капсулы помещали полученную в предыдущих исследованиях эмульсию эфирных масел пихты и кедрового дерева (соотношение масел 15:85, соотношение *TWEEN 80* к эфирным маслам 1:1). При работе на инкапсуляторе *BUCHI B-390* использовали 1,5%-раствор альгината натрия с динамической вязкостью 1000 сП. Режим инкапсулирования был выбран на основе предыдущих исследований [20] – частота 1500 Гц, время 30-35 минут. При инкапсулировании использовались две различные форсунки – 120 и 150 мкм. Для сравнения часть образцов была приготовлена при помощи ультразвуковой обработки при частоте 22 кГц, мощности 100% и обработке в бане со льдом – 10 минут. Другая часть – при помощи диспергирования лабораторным диспергатором в две ступени: 9500 оборотов в минуту в течение 5 минут и 21500 оборотов в минуту в течение 15 минут. Выход капсул после процесса инкапсулирования измерялся при помощи процесса отстаивания в течение 2 часов и последующего измерения отделившейся масляной фазы.

Для микроскопирования образцов капсул использовался лабораторный микроскоп *Axio Lab.A1* (производитель Carl Zeiss, Германия) с увеличением $\times 63$.

Результаты. При исследовании жирно-кислотного состава эфирного масла пихты установлено содержание одиннадцати жирных кислот, включая восемь насыщенных и три ненасыщенные жирные кислоты в диапазоне от *C14* до *C24* (табл. 1). Насыщенные жирные кислоты присутствовали в гораздо большем количестве (36,23%), чем ненасыщенные (20,11%). Было обнаружено, что изопальмитиновая кислота является основной насыщенной жирной кислотой (16,55%), а олеиновая кислота является преобладающей ненасыщенной кислотой (14,57%). Следующими по величине насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами были метилпальмитиновая кислота (5,79%) и изостеариновая кислота (5,47%).

Жирно-кислотный состав кедрового масла представлен суммарным составом ненасыщенных жирных кислот (67,90%), моновенасыщенных жирных кислот (24,40%) и насыщенных жирных кислот (7,95%) (табл. 2). Основная масса полиненасыщенных жирных кислот представлена линолевой (46,23%) и γ -линоленовой (20,3%) кислотами. В числе моновенасыщенных кислот преобладает

олеиновая (22,75%) кислота. Пальмитиновая (4,87%) и стеариновая (2,97%) кислоты преобладают в составе насыщенные жирных кислот.

При разработке вариантов возможных решений инкапсулированных форм биологически активных компонентов, помещенных в пищевые микроконтейнеры, использовали инкапсулятор BUCHI В-390 и альгинатную оболочку капсул. В капсулы помещали полученную в предыдущих исследованиях эмульсию эфирных масел пихты и кедра (соотношение масел 15:85). При работе на инкапсуляторе BUCHI В-390 использовали 1,5%-раствор альгината натрия с динамической вязкостью 1000 сП. Режим инкапсулирования был выбран на основе предыдущих исследований – частота 1500 Гц, время 30-35 минут. При инкапсулировании использовались две различ-

ные форсунки – 120 и 150 мкм. Предварительная подготовка раствора для инкапсулирования проводилась в двух вариантах – обработка ультразвуковым генератором и обработка диспергатором. После инкапсулирования капсулы помещались в 4% раствор хлорида кальция на 0,5-1 ч при постоянном перемешивании на магнитной мешалке. Следующий этап получения капсул – промывание этиловым спиртом. Оно более эффективно в отличие от промывания водой. Высушивание спирта с поверхности капсул проводилось в течении суток при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ в тонком слое капсул при естественной конвекции.

Ниже приведены микроскопические картинки капсул, полученных при помощи форсунок 150 мкм и 120 мкм (рис .1).

Таблица 1 – Жирно-кислотный состав эфирного масла пихты

Кислота	Массовая доля, %
Насыщенные жирные кислоты, в том числе:	36,23
Изопальмитиновая кислота ($C_{16:0}$)	16,55
Метилпальмитиновая кислота ($C_{16:0}$)	5,79
Изостеариновая кислота ($C_{18:0}$)	5,47
Ненасыщенные жирные кислоты, в том числе:	20,11
Олеиновая кислота ($C_{18:1}$)	14,57

Таблица 2 – Жирно-кислотный состав эфирного масла кедра

Кислота	Массовая доля, %
Насыщенные жирные кислоты, в том числе:	7,95
Пальмитиновая кислота ($C_{16:0}$)	4,87
Стеариновая кислота ($C_{18:0}$)	2,97
Ненасыщенные жирные кислоты, в том числе:	91,34
Линолевая кислота ($C_{18:2}$)	46,23
γ -линоленовая кислота ($C_{18:2}$)	20,81
Олеиновая кислота ($C_{18:1}$)	22,75

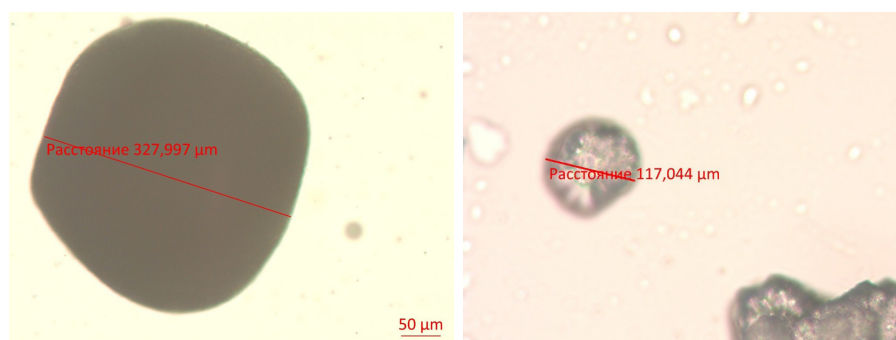


Рисунок 1 – Микроскопические картинки капсул, полученных при помощи форсунки 150 мкм (слева) и 120 мкм (справа)

Средний диаметр капсул, полученных при помощи форсунки 150 мкм, более 300 мкм, при помощи форсунки 120 мкм – менее 200 мкм. Размер капсул не зависел от этапа предварительной подготовки раствора для инкапсулирования. Выход капсул так же был примерно одинаковый – 95% при ультразвуковой обработке и 90% при обработке диспергированием.

Обсуждение. Данные спектрометрии показывают достаточно большое содержание линолевой кислоты (ω -6) в масле кедра – 46,23%, что в свою очередь соответствует показателям ГОСТ 30623-2018 [21]. По данным методических рекомендаций МР 2.3.1.

0253-21 [22] потребность в полиненасыщенных жирных кислотах (ПНЖК) составляет 5-10% от суточной калорийности рациона, потребность в ω -6 составляет 5-8%. Исходя из данных рекомендаций среднестатистическому человеку весом 70 кг и суточным рационом 2000 кКал необходимо примерно 11 г линолевой кислоты в сутки. Для удовлетворения суточной потребности на 15%, что сделает продукт функциональным с точки зрения содержания ω -6, необходимое содержание линолевой кислоты в продукте должно составлять 1,65 г, что соответствует 3,57 г масла кедра, при расчете содержания кислоты

46,23%.

При необходимом содержании эфирного масла кедра 3,57 г, что должно составлять 85% смеси масел для эмульгирования, количество масла пихты будет составлять 0,63 г или 15%. Суммарная масса жиров смеси масел для удовлетворения 15% суточной потребности ω -6 составит 4,2 г.

Масла пихты и кедра также богаты олеиновой кислотой, которая в свою очередь относится к моновенасыщенным жирным кислотам (МНЖК) по методическим рекомендациям МР 2.3.1.0253-21 [22] и входит в семейство ω -9 ненасыщенных жирных кислот. Содержание олеиновой кислоты в масле кедра составляет 22,75%, соответственно в 3,57 г масла содержится 0,81 г ω -9. Содержание олеиновой кислоты в масле пихты составляет 14,57%, соответственно в 0,63 г масла содержится 0,09 г ω -9. Суммарное содержание олеиновой кислоты в смеси масел весом 4,2 г – 0,9 г.

После инкапсулирования содержание масляной фазы составляет 50% от веса высушенных капсул. Соответственно для наличия 4,2 г смеси масел вес капсул составит 8,4 г на порцию продукта.

Ультразвуковая обработка существенно ускорила процесс получения капсул, так как при диспергировании идет достаточно активный процесс пенообразования и в дальнейшем необходим процесс отстаивания в течение 0,5-1 ч для удаления пузырьков растворившегося воздуха. Стадия промывания спиртом позволяет получить рассыпчатые, не слипающиеся капсулы, с минимальным количеством масла на поверхности, что обусловлено низкой температурой испарения спирта.

Полученные капсулы не имеют запаха и вкуса, что говорит об отсутствии дальнейшего влияния на органолептические свойства продукта. Размер капсул, полученных при помощи форсунки 120 мкм, составляет менее 200 мкм, что существенно меньше, чем в других исследованиях [23, 24], где размер полученных капсул более 350 мкм. Такой диаметр капсул делает их пригодными для дальнейшего использования в различных технологиях продуктов питания без существенного влияния на органолептические и структурно-механические характеристики полученных функциональных продуктов. Маленький размер капсул делает их менее заметными в продукте и уменьшает вероятность раскусывания и высвобождения масел в ротовой полости при употреблении.

Выводы. Обогащение эфирными маслами пихты и кедра позволяет внести в продукт дополнительный источник ω -6 и ω -9 ненасыщенных жирных кислот. Для удовлетворения 15% суточной потребности в ω -6 рекомендуется добавление в порцию продукта 8,4 г полученных капсул. Содержание ω -9 в данном количестве инкапсулированного биологически активного компонента составит 0,9 г.

Капсулы, полученные при помощи форсунки 120 мкм (состав раствора для инкапсулирования:

эфирные масла пихты и кедра в соотношении 15:85 20%, поверхностно-активное вещество *TWEEN* 80 20%, 1,5% альгинат натрия) имеют размер менее 200 мкм. Это позволит в дальнейшем использовать их при обогащении продуктов питания без существенного влияния на органолептические и физико-химические свойства продукта. Применение ультразвуковой обработки при частоте 22 кГц и мощности 100% в течение 10 минут в качестве первичного этапа инкапсуляции позволяет сократить время производства капсул на 1 час. В данном случае не осуществляется процесс диспергирования и, соответственно, нет необходимости в отстаивании полученной эмульсии перед загрузкой в инкапсулятор для удаления пузырьков воздуха.

Полученные капсулы могут использоваться в пищевой промышленности для обогащения продуктов питания и использования ценных биологических свойств эфирных масел пихты и кедра. Дальнейшие исследования будут направлены на изучения влияния добавления полученного биологически активного компонента на свойства функциональных продуктов. Продукты питания, обогащенные полученными капсулами, могут получить наилучшую органолептическую оценку со стороны потребителей ввиду размера капсул и отсутствия резкого запаха эфирных масел. Также данные капсулы могут использоваться в косметической и фармацевтической промышленности для получения новых продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Fotini P., Adamantini P. Micro- and Nano-encapsulation as Tools for Essential Oils Advantages' Exploitation in Food Applications: the Case of Oregano Essential Oil. – 2022. – № 15. – С. 949-977. – DOI: 10.1007/s11947-021-02746-4.
2. Costa G., Gidaro M.C., Vulla D., Supuran C.T., Alcaro S. Active components of essential Oils as anti-obesity drugs investigated by in silico techniques // J Agric Food Chem. – 2016. – № 64(26). – С. 5295-5300. – DOI: 10.1021/acs.jafc.6b02004.
3. da Silveira E., Sá R.D.C., Andrade L.N., De Oliveira R.D.R.B., De Sousa D.P. A review on anti-inflammatory activity of phenylpropanoids found in essential oils // Molecules. – 2014. – № 19(2). – С. 1459-1480. – DOI: 10.3390/molecules19021459.
4. Rashed A.A., Mohd Nawi M.N., Sulaiman K. Assessment of essential oil as a potential anti- obesity agent: a narrative review Assessment of essential oil as a potential anti- obesity agent: a narrative review // J Essent Oil Res. – 2017. – № 29(1). – С. 1-10. – DOI: 10.1080/10412905.2016.1213668.
5. Prakash B., Kedia A., Mishra P.K., Dubey N.K. Plant essential oils as food preservatives to control moulds, mycotoxin contamination and oxidative deterioration of agri-food commodities-potentials and challenges // Food Control. – 2015. – № 47. – С. 381-391. – DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.07.023.
6. Astray G., Gonzalez-Barreiro C., Mejuto JC, Rial-Otero R, Simal-Gándara J. A review on the use of cyclodextrins in foods // Food Hydrocoll. – 2009. – № 23(7). – С. 1631-1640. – DOI: 10.1016/j.foodhyd.2009.01.001.
7. Turek C., Stintzing F.C. Stability of essential oils: a review // Compr Rev Food Sci Food Saf. – 2013. – № 12(1). – С. 40-53. – DOI: 10.1111/1541-4337.12006.
8. Shirish H.S., Bharat A.B., Manickam S., Shital B.P. Current overview of encapsulation // Encapsulation of Active Molecules and Their Delivery System. – 2020. – № 1. – С. 1-8. – DOI: 10.1016/B978-0-12-819363-1.00001-6.
9. Yamashita C., Chung M.M.S., Santos C., Mayer C.R.M., Moraes I.C.F., Branco I.G. Microencapsulation of an anthocyanin-rich blackberry (*Rubus* spp.) by-product extract by freeze-drying // LWT. – 2017. – № 84. – С. 256-262. – DOI: 10.1016/j.

lwt.2017.05.063.

10. Gómez B., Barba F.J., Domínguez R., Putnik P., Bursać Kovačević D., Pateiro M., Toldrá F., Lorenzo J.M.. Microencapsulation of antioxidant compounds through innovative technologies and its specific application in meat processing // *Trends in Food Science and Technology*. – 2018. – № 82. – С. 135-147. – DOI: 10.1016/j.tifs.2018.10.006.

11. Sedaghat Doost A., Nikbakht Nasrabadi M., Kassozi V., Nakisozi H., Van der Meeren P. Recent advances in food colloidal delivery systems for essential oils and their main components // *Trends in Food Science and Technology*. – 2020. – № 99. – С. 474-486. – DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.037.

12. Douglas R.R., Alan A., Marco D.L.. Encapsulated essential oils: A perspective in food preservation // *J. Future Foods*. – 2022. – № 5. – С. 100126. – DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100126.

13. Kaade W., Ferrando M., Khanmohammed A., Torras C., De Lamo-Castellví S., Güell C. Low-energy high-throughput emulsification with nickel micro-sieves for essential oils encapsulation // *J. Food Eng.* – 2019. – № 263. – С. 326-336. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.07.006.

14. Sedaghat Doost A., Nikbakht Nasrabadi M., Kassozi V., Nakisozi H., Van der Meeren P. Recent advances in food colloidal delivery systems for essential oils and their main components // *Trends in Food Science and Technology*. – 2020. – № 99. – С. 474-486. – DOI: 10.1016/j.tifs.2020.03.037.

15. Ribeiro-Santos R., Andrade M., Sanches-Silva A. Application of encapsulated essential oils as antimicrobial agents in food packaging // *Current Opinion in Food Science*. – 2017. – № 14. – С. 78-84. – DOI: 10.1016/j.cofs.2017.01.012.

16. Kfoury M., Auezova L., Greige-Gerges H., Fourmentin S.. Encapsulation in cyclodextrins to widen the applications of essential oils // *Environmental Chemistry Letters*. – 2019. – № 17. – С. 129-143. – DOI: 10.1007/s10311-018-0783-y.

17. Choyun K., Chorong S. Physiological and Psychological Relaxation Effects of Fir Essential Oil on University Students // *International Journal of Environmental Research and Public Health* (IJERPH). – 2022. – № 19(9). – С. 5063. – DOI: 10.3390/ijerph19095063.

18. Marjanović-Balaban Ž., Gojković Cvjetković V., Stanojević L.P., Stanojević J. Quality Testing of Industrially Produced Essential Oil of Fir (*Abies alba* L.) from the Republic of Srpska // *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. – 2020. – № 23(3). – С. 503-513. – DOI: 10.1080/0972060X.2020.1799869.

19. Saab A.M., Gambari R., Sacchetti G., Guerrini A., Lampronti I., Tacchini M., Samrani A.E., Medawar S., Makhlouf H., Tannoury M., Abboud J., Diab-Assaf M., Kijjoo A., Tundis R., Aoun J., Efferth T. Phytochemical and pharmacological properties of essential oils from *Cedrus* species // *Natural Product Research*. – 2017. – № 32(2). – С. 1-13. – DOI: 10.1080/14786419.2017.1346648.

20. Gedawy A., Dass C.R., Al-Salami H. Polydimethylsiloxane-customized nanoplateform for delivery of antidiabetic drugs // *Therapeutic Delivery*. – 2020. – № 11(7). – С. 415-429. – DOI: 10.4155/tde-2020-0049.

21. ГОСТ 30623-2018. Масла растительные и продукты со смешанным составом жировой фазы. Метод обнаружения фальсификации.

22. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г.).

23. Ильина В.С., Соколова О.Б., Шуватова Е.Д., Аллюх П., Мельяков Р.М., Лепешкин А.И., Александрова И.В., Бараненко Д.А. Способ микроинкапсулирования масел, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты, для использования в составе функциональных пищевых продуктов // *Ползуновский вестник*. – 2023. – № 2. – С. 7-14. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001.

24. Chew S.C., Nyam K.L. Microen-capsulation of kenaf seed oil by co-extrusion technology // *Journal of food engineering*. – 2016. – № 175. – С. 43-50. – DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.12.002.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 664.681.1: 633.13: 613.2

EDN: IGUOJO

ИЗУЧЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ САХАРНОГО ПЕЧЕНЬЯ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ИНГРЕДИЕНТАМИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2364-7307

AuthorID: 934240

ORCID: 0000-0003-3865-9989

ОСИПЕНКО Елена Юрьевна, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Менеджмента и сервиса»

Дальневосточный государственный аграрный университет

(675005, Россия, Благовещенск, улица Политехническая, 86, e-mail: osipenkoelenu@mail.ru)

SPIN: 8482-0696

AuthorID: 502519

ORCID: 0000-002-3022-8810

ДЕНИСОВИЧ Юлия Юрьевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Менеджмента и сервиса»

Дальневосточный государственный аграрный университет

(675005, Россия, Благовещенск, улица Политехническая, 86, e-mail: denisovich.78@mail.ru)

SPIN: 9630-6896

AuthorID: 726819

ORCID: 0000-003-1533-548X

КИЧИГИНА Екатерина Юрьевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Менеджмента и сервиса»

Дальневосточный государственный аграрный университет

(675005, Россия, Благовещенск, улица Политехническая, 86, e-mail: katyvodolagina@gmail.com)

Аннотация. В статье представлены результаты исследования потребительских свойств сахарного печенья с внесением функциональных ингредиентов. Цель работы заключалась в изучении возможности применения нетрадиционных видов сырья растительного происхождения в производстве сахарного печенья, изучении потребительских свойств и комплексной оценке качества готового продукта. В качестве функциональных ингредиентов использовали муку, изготовленную из зерна нута и премикс «Лавитол-В», в состав которого входит водорастворимый комплекс флавоноида дигидрокверцетина и полисахарида арабиногалактана. Объектами исследования являлись: мука нутовая и мука пшеничная первого сорта, мучное кондитерское изделие – печенье сахарное, выработанное по стандартной рецептуре, опытные образцы печенья «Снуги» с различным количественным соотношением муки из нута и премиксом «Лавитол-В». Количество нутовой муки в опытных образцах составило 5,15 и 25%, «Лавитола-В» во всех рецептурах 3% к массе пшеничной муки. Физико-химические, микробиологические и органолептические показатели определяли по стандартным методикам в соответствии с нормативно-технической документацией. По результатам органолептического анализа, для дальнейших исследований был выбран образец, с включением в рецептуру 15% муки из нута и 3,0% премикса «Лавитол-В». Показатели химического состава свидетельствуют о том, что применение нутовой муки при производстве сахарного печенья способствовало повышению пищевой ценности опытного образца изделия по сравнению с контролем. Результаты исследования аминокислотного и жирнокислотного составов образцов печенья также показали преимущество опытного образца над контрольным. При изучении физико-химических показателей установлено, что при внесении функциональных ингредиентов в рецептуру печенья происходит повышение намокаемости и снижения влажности готовых изделий, увеличивается водопоглощательная способность. Данные микробиологического исследования свидетельствуют о соответствии изучаемых показателей требованиям ТР ТС 021/2011. Таким образом, можно заключить, что предложенный пищевой продукт – сахарное печенье «Снуги» обладает высокими потребительскими свойствами, что позволяет рекомендовать его для систематического употребления в составе пищевых рационов, как источника пищевых волокон и природных антиоксидантов.

Ключевые слова: сахарное печенье, потребительские свойства, мука из нута, технология производства, функциональные ингредиенты, арабиногалактан, дигидрокверцетин, пищевая ценность, программа производственного контроля.

STUDY OF CONSUMER PROPERTIES OF SUGAR COOKIES WITH FUNCTIONAL INGREDIENTS

© The Author(s) 2025

OSIPENKO Elena Yuryevna, candidate of biological sciences,

associate professor of the Department of Management and Service

Far Eastern State Agrarian University

(675005, Russia, Blagoveshchensk, street Politechnicheskaya 86, e-mail: osipenkoelenu@mail.ru)

DENISOVICH Yulia Yuryevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Management and Service

Far Eastern State Agrarian University

(675005, Russia, Blagoveshchensk, street Politechnicheskaya 86, e-mail: dennisovich.78@mail.ru)

KICHIGINA Ekaterina Yuryevna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Management and Service

Far Eastern State Agrarian University

(675005, Russia, Blagoveshchensk, street Politechnicheskaya 86, e-mail: katyvodolagina@gmail.com)

Abstract. The article presents the results of a study of consumer properties of sugar cookies with the addition of functional ingredients. The purpose of the work was to study the possibility of using non-traditional types of raw materials of plant origin in the production of sugar cookies, study consumer properties and comprehensive assessment of the quality of the finished product. Flour made from chickpea grain and the premix «Lavitol-V», which includes a water-soluble complex of the flavonoid dihydroquercetin and the polysaccharide arabinogalactan, were used as functional ingredients. The objects of the study were: chickpea flour and first-grade wheat flour, flour confectionery - sugar cookies produced according to a standard recipe, pilot samples of "Snooty" cookies with different quantitative ratios of chickpea flour and the premix «Lavitol-V». The amount of chickpea flour in the pilot samples was 5.15 and 25%, «Lavitol-V» in all recipes 3% of the weight of wheat flour. Physicochemical, microbiological and organoleptic indicators were determined using standard methods in accordance with regulatory and technical documentation. Based on the results of the organoleptic analysis, a sample with 15% chickpea flour and 3.0% Lavitol-V premix included in the recipe was selected for further research. The chemical composition indicators indicate that the use of chickpea flour in the production of sugar cookies contributed to an increase in the nutritional value of the pilot product compared to the control. The results of the study of the amino acid and fatty acid compositions of the cookie samples also showed the advantage of the pilot sample over the control. When studying the physicochemical indicators, it was found that when functional ingredients are added to the cookie recipe, the wettability of the finished products increases and the moisture content decreases, and the water absorption capacity increases. The microbiological study data indicate that the studied indicators comply with the requirements of TR CU 021/2011. Thus, we can conclude that the proposed food product – sugar liver “Snooty” – has high consumer properties, which makes it possible to recommend it for systematic use as part of diets, as a source of dietary fiber and natural antioxidants.

Keywords: sugar cookies, consumer properties, chickpea flour, production technology, functional ingredients, arabinogalactan, dihydroquercetin, nutritional value, production control program.

Для цитирования: Осипенко Е.Ю. Изучение потребительских свойств сахарного печенья с функциональными ингредиентами / Е.Ю. Осипенко, Ю.Ю. Денисович, Е.Ю. Кичигина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 58-67. – EDN: IGUOJO.

Введение. Предприятия пищевой промышленности вырабатывают разнообразный ассортимент мучных кондитерских изделий, в частности печенье, которое пользуется регулярным спросом у населения различных возрастных групп. Высокая калорийность, недостаток белка, пищевых волокон, витаминов свидетельствует о необходимости корректировки рецептурного состава, повышения пищевой и биологической ценности мучных кондитерских изделий [1, 2]. Одним из важных направлений в совершенствовании рецептуры и ассортимента мучных изделий является использование безопасных нетрадиционных сырьевых ресурсов растительного происхождения.

Оценка товарного предложения показывает, что на рынке кондитерских изделий Амурской области максимальный сегмент занимает сахарное печенье. Следовательно, можно предположить о возможности его использования для обогащения пищевыми нутриентами.

Большой интерес вызывает высокопротеиновая сельскохозяйственная культура – нут, в котором содержится высококачественный и легкоусвояемый белок (до 32% на сухое вещество). По содержанию

β -каротина зерно нута превосходит все зернобобовые культуры. β -каротин является мощным антиоксидантом, обладает иммуностимулирующими защитным действием. Большое содержание пищевых волокон, клетчатки, марганца, фосфора, фолиевой кислоты делают этот продукт необходимым и полезным для населения всех социальных категорий [3, 4].

Исследования Крохалева В.А. показали, что внесение растительной добавки на основе нута в количестве 10% от общей массы пшеничной муки в рецептурные составы бисквитных полуфабрикатов позволяет обогатить вкусо-ароматический профиль готовых изделий, сформировать равномерную и тонкостенную пористость мякиша, повысить содержание основных пищевых веществ [5].

Изучению использования муки из цельносоломых семян нута в производстве хлебобулочных и кондитерских изделий были посвящены работы Садыковой М.К. [6], Магомедова Г.О., Лукиной С.И. [7], которые позволяют раскрыть целесообразность использования данной зернобобовой культуры в качестве добавки для улучшения функционально-технологических свойств сбивных хлебобулочных изделий, кексов, заварных полуфабрикатов.

Исследования, проводимые учеными Воронежского государственного университета позволили разработать рецептуры пряничных изделий с повышенной пищевой и биологической ценностью с применением муки из семян нута и муки из отрубей гречишных [8].

Результаты исследователей Казанцевой И.Л., Кулеватовой Т.Б. [9], Тертычной Т.Н., Мажулиной И.В. [10], Гришина В.С., Ткачковой Н.А. и др. [11] показали возможность использования композитной смеси (пшеница, нут) и проростков из семян нута в рецептурах вафель, затяжного и сдобного печенья, коржиков, теста для пельменей с целью увеличения белковых веществ, клетчатки, витаминов, минеральных компонентов и оптимизации технологического процесса изготовления готовых изделий.

В качестве структурообразующей добавки, влагоудерживающего компонента, для восполнения дефицита белка мы использовали муку, изготовленную из зерна нута бараньего. Внесение незначительного количества нутовой муки в рецептуру, как составляющего ингредиента, позволяет увеличить питательную ценность, изменить реологические свойства теста в лучшую сторону, повысить вкусовые качества готового продукта.

Перспективным направлением при разработке функциональных продуктов питания является их обогащение природными источниками биологически активных веществ, одним из которых является премикс с дигидрокверцетином «Лавитол-В». «Лавитол-В» – пищевая добавка в состав которой входит водорастворимый комплекс флавоноида дигидрокверцетина и полисахарида арабиногалактана [12-14].

Дигидрокверцетин обладает чрезвычайно широким диапазоном профилактических свойств [15-20].

Целесообразность применения дигидрокверцетина в производстве функциональных продуктов питания обоснована отечественными и зарубежными учеными [21-23].

Авторами Бабухадия К.Р. и Решетник Е.И. исследована возможность применения пищевой добавки «Лавитол-арабиногалактан» для обогащения творожных продуктов пищевыми волокнами [24].

АО «Аметис», совместно с учеными Дальневосточного ГАУ разработан способ получения йогурта с гипогликемическим действием, обогащенного комплексом дигидрокверцетина и арабиногалактана. Авторами доказано, что разработанный способ позволяет получить йогурт с гипогликемическим действием, функциональной направленности, повысить его антиоксидантную активность, пищевую и биологическую ценность (патент № 2778996 С1).

Для увеличения хранимостпособности и стабильности компонентов, придания продукту функциональных свойств, печенье сахарное обогащали природным антиоксидантом в виде пищевой добавки

«Лавитол-В», получаемой из растительного сырья Амурской области.

Таким образом, разработка технологии мучных кондитерских изделий функциональной направленности является актуальной.

Цель исследования – рассмотреть возможность применения нетрадиционных видов сырья растительного происхождения в производстве сахарного печенья и изучить его потребительские свойства.

Задачи исследования: провести сравнительный анализ химического состава нутовой и пшеничной муки; разработать рецептуру и совершенствовать технологию сахарного печенья с применением функциональных ингредиентов; исследовать химический, аминокислотный и жирнокислотный составы опытного и контрольного образцов; определить физико-химические, микробиологические и органолептические показатели готового изделия; разработать программу контроля производства печенья «Снути» на основе принципов ХАССП.

Методология. Объектами исследования являлись: мука нутовая торговой марки «Образ жизни», изготовленная по ТУ 10.61.20-001-38744625-2016, мука пшеничная первого сорта, мучное кондитерское изделие – печенье сахарное, выработанное с ингредиентами по стандартной рецептуре, без внесения добавок (контрольный образец), опытные образцы печенья «Снути» с различным количественным соотношением муки из нута и премиксом «Лавитол-В».

Количество нутовой муки в опытных образцах составило 5,15 и 25%, «Лавитола-В» во всех рецептурах 3% к массе пшеничной муки.

Эксперименты проводили в лабораториях Дальневосточного ГАУ, лаборатории переработки сельскохозяйственной продукции ВНИИ сои г. Благовещенска, лабораториях ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Амурской области», ФБУ «Амурский ЦСМ», ФГБУ «Амурский референтный центр Россельхознадзора».

Значения полученных органолептических и физико-химических показателей сравнивали с ГОСТ 24901-2014, значения микробиологических показателей с ТР ТС 021/2011.

Выявление всех видов потенциальных опасностей (биологических, химических и физических) при производстве печенья «Снути» осуществляли по ГОСТ 51705.1-2001 методом «мозгового штурма».

Разработку рецептуры и программы производственного контроля проводили с применением программного обеспечения «ХАССП 2.0. Общепит» [25].

Результаты. На начальном этапе исследований проведен сравнительный анализ количества основных пищевых веществ в муке из семян нута и пшеничной муке первого сорта.

Полученные данные представлены на рисунках 1 и 2.

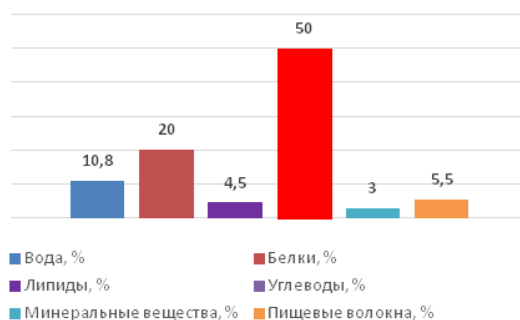


Рисунок 1 – Химический состав нутовой муки

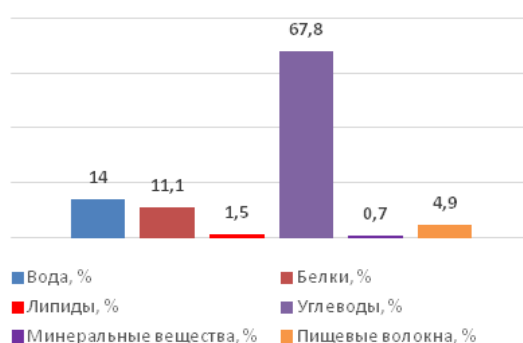


Рисунок 2 – Химический состав пшеничной муки первого сорта

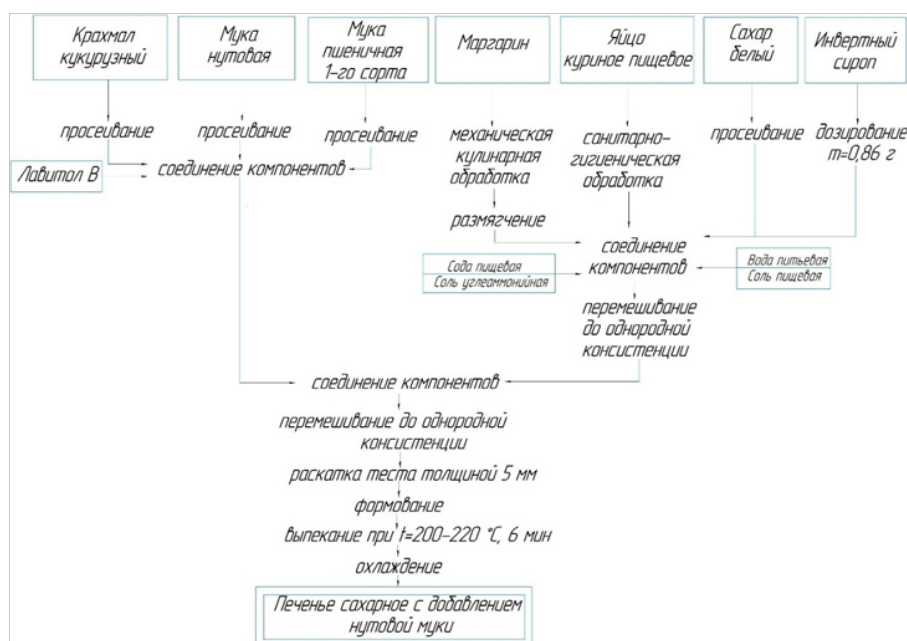


Рисунок 3 – Технологическая схема производства сахарного печенья «Снутти»

Анализируя рисунки 1 и 2, можно сделать заключение, что энергетическая ценность образцов нутовой и пшеничной муки первого сорта практически не отличается и составляет 320,5 и 329,0 ккал соответственно. При этом, по другим, отмеченным на рисунках показателям, нутовая мука превосходит пшеничную. Таким образом, высокая пищевая ценность нутовой муки позволяет рекомендовать её в качестве белковой и минеральной составляющих для балансирования микронутриентного состава мучной кондитерской продукции.

При разработке рецептуры опытных образцов, за основу была принята стандартная рецептура сахарного печенья. Отличительной особенностью разрабатываемого продукта является включение в рецептуру нутовой муки в количестве 5,15 и 25% к массе пшеничной муки и 3% премикса «Лавитол-В». Количество остальных ингредиентов, входящих в состав рецептуры, осталось без изменений.

Далее, была совершенствована технология сахарного печенья с добавлением функциональных ингредиентов (рис. 3).

Подготовку сырья и проведение технологических операций осуществляли согласно сборника рецептур для предприятий общественного питания, подготовку и введение премикса «Лавитол-В» проводили в соответствии с ТР ТС 029/2012. По стандартной технологической схеме были приготовлены контрольный и опытные образцы сахарного печенья с внесением различной дозировки нутовой муки и 3% премикса «Лавитол-В»: образец № 1 (5 %), образец № 2 (15%), образец № 3 (25%). В качестве контроля служил образец № 4 – без добавления функциональных ингредиентов.

Затем, контрольный и опытные образцы печенья были исследованы по основным органолептическим показателям (рис. 4).

Из рисунка 4 следует, что суммарное количество баллов в контрольном и опытных образцах составило 32,7; 32; 34,2 и 29,7 соответственно.

При оценке формы изделий существенных различий между исследуемыми образцами не выявлено. Снижение оценки за показатель «вид в изломе» в опытном образце №3 объясняется недостаточно равномерной структурой изделия.

Органолептическая оценка показала, что

контрольный и опытные образцы с добавлением нутовой муки в количестве 5% и 15% от массы сырья обладали приятным вкусом и ароматом, свойственными сахарному печенью. При этом, в образце №3 отмечался специфический привкус горечи и бобового послевкуся, что ухудшило органолептические показатели.

Консистенция опытных образцов №2 и №3 была более рассыпчатая, хрупкая по сравнению с контрольным образцом и образцом №1. Таким образом, по совокупности набранных баллов и характеристикам органолептических показателей, для дальнейших исследований был выбран образец №2.

Далее, в соответствии поставленными задачами, были исследованы химический, аминокислотный и жирнокислотный составы опытного и контрольного образцов.

Данные химического состава опытного и контрольного образцов представлены в таблице 1.

Данные таблицы 1 показывают, что применение нутовой муки и премикса «Лавитол-В» при производстве сахарного печенья способствовало повышению пищевой ценности опытного образца изделия по сравнению с контролем.

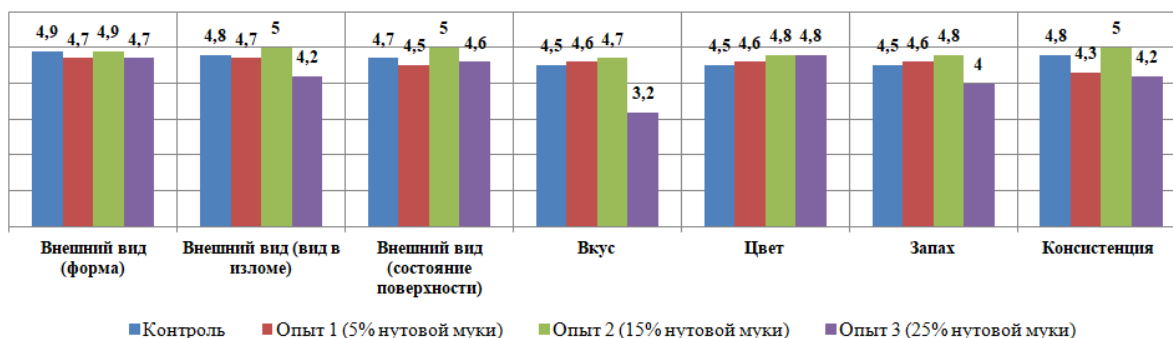


Рисунок 4 – Результаты органолептической оценки контрольного и опытных образцов печенья

Таблица 1 – Химический состав, энергетическая ценность сахарного печенья, г/100г продукта

Показатели	Содержание в исследуемых образцах, 100 г продукта	
	сахарное печенье (контроль)	сахарное печенье «Снуги» с применением нута (опыт)
Белки, г	8,29±0,38	14,76±0,47
Жиры, г	11,73±0,34	11,68±0,33
Углеводы, г	68,25±0,24	60,60±1,02
Пищевые волокна, г	2,67±0,02	5,74±0,03
Энергетическая ценность, ккал/кДж	411,73 / 1725,15	406,56 / 1703,49

Сравнительные результаты показателей биологической ценности качества пищевого белка испытуемых образцов готовых изделий и образца пищевого нетрадиционного сырья (нутовой муки) приведены в таблице 2.

Анализ таблицы 2 показал, что общее относительное содержание эссенциальных аминокислот в опытном и контрольном образцах печенья составляет 32,82% и 24,01% соответственно. Расчет показал, что, исходя из общего количества белка в сахарном печенье «Снуги», равном 14,76±0,47г/100 г, содержание незаменимых кислот в 100 г готового изделия оставило 4,9 г. При этом содержание незаменимых

аминокислот в 100 г контрольного образца сахарного печенья составило 1,99 г. Разница равна 59% в пользу обогащенного нутовой мукой изделия. Что касается заменимых аминокислот, их относительное содержание в контрольном образце составило 29,06%, в опытном – 25,68%. На первый взгляд, в процентном отношении, содержание заменимых аминокислот в контроле на 3,38% выше по сравнению с опытным образцом. Однако, исходя из общего количества белка в каждом образце, следует отметить более высокое содержание заменимых аминокислот в опытном образце (5,8 г). Показатели жирнокислотного состава образцов отражены в таблице 3.

Таблица 2 – Аминокислотный состав сахарного печенья (контроль) и (опыт)

Аминокислота	Суточная потребность, г	Содержание в исследуемых образцах, %	
		Печенье сахарное (контроль)	Печенье сахарное (опыт)
Незаменимые аминокислоты			
Метионин + цистеин	2-4 / 2-3	1,33±0,05	1,87±0,07
Лизин	3-5	2,13±0,03	3,95±0,04
Фенилаланин	2-4	3,36±0,06	4,84±0,04
Валин	3-4	2,54±0,04	5,70±0,04
Лейцин	4-6	3,85±0,06	2,76±0,05
Изолейцин	3-4	4,58±0,05	4,30±0,04
Треонин	2-3	6,22±0,04	9,44±0,04
Общее содержание незаменимых аминокислот		24,01	32,82
Заменимые аминокислоты			
Аланин + глицин	3 / 2-3	3,76±0,06	5,46±0,06
Пролин	5	11,15±0,05	10,18±0,04
Глутаминовая кислота	16	5,69±0,04	2,58±0,04
Серин	3	3,09±0,02	3,79±0,02
Тирозин	3-4	1,27±0,03	7,52±0,02
Общее содержание заменимых аминокислот		24,96	29,53
Общее содержание аминокислот		48,97	61,35

Таблица 3 – Жирнокислотный состав сахарного печенья (контроль) и (опыт)

Показатели	Содержание в исследуемых образцах, %	
	Печенье сахарное (контроль)	Печенье сахарное (опыт)
Насыщенные жирные кислоты	22,01	24,22
- C _{16:0} пальмитиновая	14,41±0,20	15,67±0,29
- C _{18:0} стеариновая	7,60±0,03	8,55±0,06
Мононенасыщенные жирные кислоты	18,23	18,96
- C _{18:1} олеиновая	18,23±0,03	18,96±0,05
Полиненасыщенные жирные кислоты	33,52	39,86
- C _{18:2} линолевая	28,46±0,08	33,69±0,03
- C _{18:3} линоленовая	5,06±0,07	6,17±0,05
Всего жирных кислот	73,76	83,04
- в том числе полиненасыщенных	33,52	39,96

Таким образом, показатель качества жиров (биологическая эффективность) опытного образца сахарного печенья «Снути» оказался выше этого показателя в контроле на 19%.

На следующем этапе исследования определены физико-химические и микробиологические показатели готового продукта.

Исследование физико-химических показателей позволяют заключить, что при внесении добавок в рецептуру печенья происходит повышение намокаемости и снижения влажности готовых изделий, увеличивается водопоглатительная способность, что, на наш взгляд, связано с гидрофильностью белков и клетчатки муки из нута и пищевой добавки

«Лавитол-В». Данные микробиологического исследования свидетельствуют о том, что изучаемые показатели соответствуют требованиям ТР ТС 021/2011.

На завершающем этапе исследований, при разработке программы производственного контроля выявляли все виды потенциальных опасностей с учетом специфики производства продукта.

После выявления потенциальных опасностей при производстве печенья «Снути», оценивали вероятность реализации опасных факторов (рис. 5).

На основании полученных данных, в соответствии с ГОСТ Р 51705.1-2001, была построена диаграмма анализа рисков (рис. 6). Если точка лежит на или выше границы – опасность учитывается, если ниже – не

учитывается.

Далее, нами были определены фазы технологического процесса производства печенья «Снуги», на которых существует вероятность возникновения физических, химических и биологических опасностей (рис. 7).

На заключительном этапе проведена идентификация потенциальных опасностей при производстве сахарного печенья «Снуги», определены контролируемые признаки и разработаны предупреждающие действия для каждой стадии производственного (технологического) процесса (табл. 4).



Рисунок 5 – Оценка вероятности реализации опасных факторов при производстве печенья «Снуги»

Влияние на здоровье (тяжесть последствий)	Область недопустимого риска			
4 — может вызывать летальный исход				
3 — может вызывать тяжелое заболевание				
2 — может вызывать заболевание				
1 — может вызывать легкое заболевание				
	1 — вероятность равна нулю	2 — вероятность мала	3 — средняя степень вероятности	4 — высокая вероятность
	Вероятность опасного фактора			

Рисунок 6 – Диаграмма анализа рисков при производстве печенья «Снуги»



Рисунок 7 – Фазы технологического процесса производства печенья «Снуги»

Таблица 4 – Идентификация потенциальных опасностей при производстве печенья «Снуги»

Фаза технологического процесса	Характеристика (описание) возможных опасностей	Контролируемые признаки	Действия (предупреждающие)
Приемка сырья	Повышенная влажность, наличие инородных примесей и недопустимых дефектов (сухие продукты, пищевая добавка); нарушение целостности упаковки, изменение органолептических показателей (маргарин); микробиологическая обсемененность, повреждение скорлупы (яйцо); срок годности	Влажность (сухие продукты, пищевая добавка «Лавитол-В»), органолептические показатели, целостность упаковки, органолептические показатели (маргарин, яйцо), срок годности (все сырье, пищевые продукты, ингредиенты)	Измерение влажности сухих продуктов (влагомер), входной контроль и идентификация, овоскопирование, обработка согласно требованиям нормативных документов (НД) (ТР ТС 021/2011, СанПиН 2.3/2.4.3590-20, ГОСТ на сырье), контроль сопроводительной документации
Хранение сырья, пищевых продуктов, ингредиентов	Изменение органолептических, микробиологических и физико-химических показателей; показателей безопасности, отсутствие маркировки, нарушение целостности упаковки	Температура, влажность, органолептические показатели, продолжительность хранения, наличие маркировки и целостности упаковки	Соблюдение сроков, режимов и условий хранения, контроль органолептических показателей, проверка целостности упаковки и наличия маркировки
Первичная (механическая кулинарная) обработка сырья	Нарушение требований по подготовке сырья, пищевых продуктов и ингредиентов к производству	Органолептические показатели, наличие посторонних примесей и предметов, подготовка сырья	Визуальный контроль, контроль наличия примесей с помощью металлодетектора, просеивание, соблюдение правил первичной обработки
Изготовление изделия	Несоблюдение технологических параметров, нарушение соотношения и количества вносимых компонентов; наличие инородных тел; загрязнение технологического оборудования, нарушение микроклимата в производственном помещении, нарушение требований личной гигиены персоналом	Параметры технологического процесса, строгое соблюдение количества вносимых ингредиентов, отсутствие инородных тел; контроль чистоты производственного инвентаря, температуры воздуха в производственном помещении, наличия средств гигиены персонала	Соблюдение технологических параметров и санитарно-гигиенических требований, норм закладки сырья
Хранение и отпуск изделия	Нарушение органолептических показателей, сроков и температурного режима, выхода (массы) изделия	Органолептические показатели, сроки реализации и хранения	Форму, поверхность, цвет, вкус и запах, вид в изломе определяют при температуре $(18\pm 5)^{\circ}\text{C}$. Продукт следует хранить в чистых, сухих, хорошо вентилируемых помещениях при $t (18\pm 5)^{\circ}\text{C}$, и относительной влажности воздуха - не более 75%.
Упаковка изделия	Нарушение целостности и безопасности упаковки	Целостность и безопасность упаковочных материалов	Проверка соответствия требованиям ТР ТС 005/2011
Транспортировка	Нарушение требований транспортировки	Условия транспортирования	Соблюдение режимов при транспортировке, соблюдение требований товарного соседства

Обсуждение. При проектировании и разработке функциональных продуктов питания большое значение придается качеству и функционально-технологическим свойствам сырья, которые оказывают влияние на показатели качества и безопасности конечного продукта.

В качестве функциональных компонентов определены мука нуттовая и премикс «Лавитол-В».

Сравнительный анализ химического состава нуттовой муки и пшеничной муки первого сорта свидетельствуют о том, что содержание общего белка в муке из нута составляет 20,0%, что в 2 раза выше по сравнению с пшеничной – 11,1%, жира в 3 раза (4,5 и 1,5% соответственно). Количество минеральных веществ и пищевых волокон в нуттовой муке выше на 76,6 и 11%.

Далее была разработана схема производства и рецептуры сахарного печенья с различным

количественным соотношением муки из нута и пищевой добавкой «Лавитол-В». В качестве опытных образцов служили образцы сахарного печенья с внесением в рецептуру 5,15 и 25% к массе муки стандартной рецептуры. Количество «Лавитола-В» во всех рецептурах составило 3% к массе муки

Результаты проведения органолептической оценки подтверждают данные полученные Крохалевым В.А. [5]. На основании проведения органолептического анализа, для дальнейших исследований был выбран образец с внесением нуттовой муки в количестве 15% к массе пшеничной и 3% премикса «Лавитол-В».

Данные химического состава печенья с добавлением нуттовой муки и пищевой добавки «Лавитол-В» свидетельствуют о повышении его пищевой ценности по сравнению с контролем. Наблюдается увеличение в нем доли белка на 6,47 г в 100 г продукта, что составляет 44% и пищевых воло-

кон на 3,07 г в 100 г продукта, что составляет 115%. При этом доля жира в опытном образце снизилась незначительно на 0,05 г/100 г продукта или на 1% по сравнению с контролем. Также в опытном образце печенья уменьшилось содержание углеводов на 11% (7,65 г/100г продукта). Значительного изменения энергетической ценности не наблюдалось, это связано с повышением доли растительного белка и пищевых волокон в опытном образце.

Результаты исследования аминокислотного и жирнокислотного составов печенья «Снути» также показали преимущество опытного образца над контрольным.

При определении физико-химических показателей получены следующие значения: влажность – печенье сахарное (контроль) $7,91 \pm 0,04\%$; печенье сахарное, обогащенное 15%-ной добавкой нутовой муки и пищевой добавкой «Лавитол-В» (опытный образец) $5,68 \pm 0,03\%$; намокаемость – печенье контроль 167,3%; печенье опытный образец 237,5%. Снижение влажности готовых изделий и увеличение водопоглатительной способности связано с гидрофильностью белков и клетчатки муки из нута и свойствами пищевой добавки «Лавитол-В».

На заключительном этапе исследования разработана программа контроля производства печенья «Снути» на основе принципов ХАССП.

Выводы. В результате проведенных исследований изучена возможность и доказана целесообразность применения нетрадиционных видов сырья растительного происхождения (муки нутовой и премикса «Лавитол-В») в производстве сахарного печенья. В соответствии с поставленными задачами, сформулированы следующие выводы. При сравнительном анализе химического состава нутовой и пшеничной муки установлена высокая пищевая ценность нутовой муки, что позволяет рекомендовать её в качестве белковой и минеральной составляющих для балансирования микронутриентного состава мучной кондитерской продукции. При проектировании рецептур опытных образцов были предложены следующие соотношения компонентов: количество нутовой муки – 5,15 и 25% к массе пшеничной муки, премикса «Лавитол-В» – 3%. Количество остальных ингредиентов, входящих в состав рецептуры, осталось без изменений. На основании проведения органолептической оценки контрольного и опытного образцов установлено, что по совокупности набранных баллов и характеристикам органолептических показателей для дальнейших исследований был выбран образец с включением в рецептуру 15% нутовой муки и 3% премикса «Лавитол-В». Далее, в соответствии с поставленными задачами, были исследованы химический, аминокислотный и жирнокислотный составы опытного и контрольного образцов. Результаты исследования показали преимущество опытного образца над контрольным. При изучении физико-химических показателей установлено, что при

внесении функциональных ингредиентов в рецептуру печенья происходит повышение намокаемости и снижение влажности готовых изделий, увеличивается водопоглатительная способность. Данные микробиологического исследования свидетельствуют о соответствии изучаемых показателей требованиям ТР ТС 021/2011. На заключительном этапе исследования проведена идентификация потенциальных опасностей при производстве сахарного печенья «Снути», определены контролируемые признаки и предложены предупреждающие действия для каждой стадии производственного (технологического) процесса. Таким образом, можно заключить, что предложенный пищевой продукт – сахарное печенье «Снути» обладает высокими потребительскими свойствами, что позволяет рекомендовать его для систематического употребления в составе пищевых рационов, как источника пищевых волокон и природных антиоксидантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Петрова С.Н., Наумова Ю.А. Сравнительная оценка пищевой ценности мучных кондитерских изделий. *Инновационная наука*. – 2022. №6-1. – С. 21-23.
2. Viola Bruschi, Ramona Teuber, Irina Dolgoplova Acceptance and willingness to pay for health-enhancing bakery products – Empirical evidence for young urban Russian consumers // *Food Quality and Preference*, Volume 46, 2015, – P. 79-91.
3. Корзан Л.С. Пищевая и лекарственная ценность семян нута // *Современные научные исследования: сборник научных трудов по материалам XIX Международной научно-практической конференции*. Анапа. – 2020. – С. 35-38.
4. Dzhaboeva A., Byazrova O., Tedtova V., Baeva Z., Kokaeva M. The use of chickpea flour in the minced meat products formula // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Т. 262. – Article number: 01026.
5. Крохалев В.А. Использование муки из нута в рецептурном составе бисквитного полуфабриката // *Вестник КрасГАУ*. – 2022. – №8. – С. 165-172.
6. Садыгова М.К., Белова М.В., Дмитриев А.А. и др. Технологические решения при производстве песочного печенья с обогащающими добавками. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. – 2018. – №3. – С.113-118.
7. Магомедов Г.О., Лукина С.И., Исраилова Х.А. Технология мучных кондитерских изделий функционального назначения. Воронеж: ВГУИТ, 2016. – 136 с.
8. Пономарева Е.И., Попов В.И., Есауленко И.Э., Лукина С.И., Алехина Н.Н. Пряничные изделия повышенной пищевой ценности с нетрадиционными видами сырья. *Вопросы питания*. – 2017. – Т. 86. – № 5. – С. 75-81.
9. Казанцева И.Л., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н. К вопросу применения муки из зерна нута в технологии мучных кондитерских изделий. *Зернобобовые и крупяные культуры*. – 2018. – № 1 (25). – С. 76-81.
10. Тертычная Т.Н., Мажулина И.В., Горбунова Е.А., Синельникова О.В. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. – 2019. – № 1. – С. 127-137.
11. Гришин В.С., Ткаченко Н.А., Лазарева Е.Ю., Гребенникова Ю.Д. Анализ эффективности обогащения мясных полуфабрикатов нутовой мукой. *Аграрно-пищевые инновации*. – 2022. – Т. 17, № 1. – С. 85-93.
12. Osipenko E., Kostrykina S. The use of the Far East wild plants in the production of functional alimentary products // *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East. Agricultural Innovation Systems*, Volume 1. Ussuriysk, 2022. – С. 628-636.
13. Riede L., Grube B. and Gruenwald J. 2013 Larch arabinogalactan effects on reducing incidence of upper respiratory infections *Curr. Med. Res. Opin.* 29 (3) 251-8.
14. Решетник Е.И., Водолагина Е.Ю., Максимюк В.А. Исследование влияния растительных компонентов на

функциональные свойства сывороточно-растительного продукта. Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 4 (35). – С. 50-56.

15. Савина А.Д., Иванов С.В., Терехов Р.П., Селиванова И.А. Исследование протекторных свойств сферической формы дигидрокверцетина на стрептозотоциновой модели диабета. Вестник фармации. – 2022. – № 4 (98). – С. 94-98.

16. Zhang, Y., Yu, J., Dong, X. D., & Ji, H. Y. (2017). Research on Characteristics, Antioxidant and Antitumor Activities of Dihydroquercetin and Its Complexes. *Molecules* (Basel, Switzerland), 23(1), 20.

17. Liu Z, Qiu D, Yang T, Su J, Liu C, Su X, Li A, Sun P, Li J, Yan L, et al. Research Progress of Dihydroquercetin in the Treatment of Skin Diseases. *Molecules*. 2023; 28(19):6989.

18. Dok-Go H., Lee K. H., Kim H. J., Lee E. H., Lee J., Song Y. S., Lee Y. H., Jin C., Lee Y. S., and Cho J., Neuroprotective effects of antioxidative flavonoids, quercetin, (+)-dihydroquercetin and quercetin 3-methyl ether, isolated from *Opuntia ficus-indica* var. *saboten*, *Brain Research*. (2003) 965, no. 1-2, 130-136.

19. Topal F, Nar M, Gocer H, et al. Antioxidant activity of taxifolin: an activity-structure relationship. *J Enzyme Inhib Med Chem*. 2016;31(4):674-683.

20. Weidmann A.E. Dihydroquercetin: more than just an impurity? *European Journal of Pharmacology*, 2012, 684: 19-26.

21. Шагаева, Н.Н. Изменение потребительских свойств рубленого полуфабриката из мяса в процессе хранения. Вестник КрасГАУ. – 2021. – № 10(175). – С. 189-194.

22. Боброва А.В., Новокшанова А.Л. Изучение влияния дигидрокверцетина на свойства кислотных сгустков на основе концентрата пахты. Молочнохозяйственный вестник. – 2023. – № 4 (52). – С. 141-152.

23. Shinozaki, F., Kamei, A., Shimada, K., Matsuura, H., Shibata, T., Ikeuchi, M., et al. (2023). Ingestion of taxifolin-rich foods affects brain activity, mental fatigue, and the whole blood transcriptome in healthy young adults: a randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Food Funct*. 14, 3600-3612.

24. Ермолаев А.О., Бабухадия К.Р., Решетник Е.И. Функциональный творожный продукт, обогащенный нетрадиционными растительными компонентами // Новые технологии. – 2021. – Т. 17. – № 4. – С. 62-71.

25. Денисович Ю.Ю., Осипенко Е.Ю., Кичигина Е.Ю., Гаврилова Г.А. Применение растительного сырья Дальневосточного региона в технологии производства функционального пищевого продукта// Дальневосточный аграрный вестник. – 2023. – Т. 17. – № 2. – С. 102-111.

Статья поступила в редакцию 16.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 004:641.1

EDN: ORGBSP

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ БАЗЫ ДАННЫХ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9329-0433

AuthorID: 1192795

ORCID: 0009-0005-2978-4659

ResearcherID: LWK-3508-2024

ЛОСЬ Михаил Александрович, аспирант, ассистент кафедры цифровых технологий

Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: Mihail12442@yandex.ru)

SPIN: 7743-5130

AuthorID: 361443

ORCID: 0000-0002-2170-1821

ResearcherID: G-6229-2018

ScopusID: 57214139422

КУРАКИН Михаил Сергеевич, доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры технологии и организации общественного питания

Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: kurakin1979@mail.ru)

SPIN: 7513-1585

AuthorID: 307536

ORCID: 0000-0003-2479-8750

ResearcherID: E-9331-2014

ScopusID: 57190976010

ДАВЫДЕНКО Наталья Ивановна, доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой технологии и организации общественного питания

Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)

SPIN: 5270-3950

AuthorID: 1242662

ORCID: 0009-0002-5706-7727

ResearcherID: KHT-7362-2024

ЛЮЦ Вероника Андреевна, студент-магистрант,

ассистент кафедры теории и методики преподавания естественнонаучных и математических дисциплин

Кемеровский государственный университет

(650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, д. 6, e-mail: veronichkalutz@mail.ru)

Аннотация. С повышением уровня заинтересованности современного общества в соблюдении принципов здорового питания, возрастает необходимость повышения уровня понимания потребителями особенностей нутриентных и потребительских свойств пищевых продуктов. С целью дополнительной поддержки потребителя, производители пищевой продукции, сети ритейла и специалисты в области нутрициологии пытаются повысить их уровень осознанности при выборе продуктов питания, используя для этого рекламные материалы, статьи и специализированные программные сервисы на интернет-ресурсах. В данной работе освещены вопросы проектирования структуры базы данных пищевой продукции, направленной на поддержку принятия решений потребителями. Проводится детальный анализ существующих баз данных в данной предметной области, оцениваются их функциональные возможности, качественные и количественные характеристики, а также системные требования. На основании полученных результатов предлагается концепция универсальной базы данных, объединяющей информацию о нутриентных и потребительских свойствах. Разрабатывается концептуальная модель специализированной информационной системы и информационная модель хранения данных, основанные на использовании методологий структурного анализа и проектирования *SADT* и *IDEF0*. Итоговая модель предназначена для дальнейшей разработки информационной системы, способствующей рациональному выбору пищевых продуктов на основе индивидуальных запросов потребителей.

Ключевые слова: проектирование базы данных, пищевая продукция, нутриентный состав пищевых продуктов, потребительские свойства продуктов питания, структура хранения данных, информационная система, концептуальная модель, здоровое питание, алиментарно-зависимые заболевания, поддержка принятий решений.

PRACTICAL JUSTIFICATION FOR DESIGNING THE STRUCTURE OF THE FOOD DATABASE

© Author(s) 2025

LOS Mikhail Aleksandrovich, postgraduate student, assistant of the Department of Digital Technologies*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya St., 6, e-mail: Mihail12442@yandex.ru)***KURAKIN Mikhail Sergeevich**, doctor of technical sciences, associate professor,
professor of Technology and Public Catering Organization Department*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo o, Krasnaya st., 6, e-mail: kurakin1979@mail.ru)***DAVYDENKO Nataliia Ivanovna**, doctor of technical sciences, associate professor,
head of Technology and Public Catering Organization Department*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya St., 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)***LUTZ Veronika Andreevna**, master's student,

assistant of the Department of Theory and Methodology of Teaching Science and Mathematical Disciplines

*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya St., 6, e-mail: veronichkalutz@mail.ru)*

Abstract. With the increasing level of interest of modern society in observing the principles of healthy nutrition, there is an increasing need to increase the level of understanding by consumers of the characteristics of nutritional and consumer properties of food products. In order to provide additional support to consumers, food manufacturers, retail chains and specialists in the field of nutrition are trying to increase their level of awareness when choosing food, using advertising materials, articles and specialized software services on Internet resources. This paper highlights the issues of designing the structure of the database of food products aimed at supporting consumer decision-making. A detailed analysis of existing databases in this subject area is carried out, their functionality, qualitative and quantitative characteristics, as well as system requirements are evaluated. Based on the results obtained, the concept of a universal database combining information on nutritional and consumer properties is proposed. A conceptual model of a specialized information system and an information model of data storage based on the use of *SADT* and *IDEF0* structural analysis and design methodologies are being developed. The final model is intended for the further development of an information system that promotes the rational choice of food products based on individual consumer requests.

Keywords: database design, food products, nutritional composition of food products, consumer properties of food products, data storage structure, information system, conceptual model, healthy nutrition, alimentary-dependent diseases, decision support.

Для цитирования: Лось М.А. Практическое обоснование проектирования структуры базы данных пищевой продукции / М.А. Лось, М.С. Куракин, Н.И. Давыденко, В.А. Люц // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 68-78. – EDN: ORGBSP.

Введение. В последние годы у потребителей в разных странах мира, в т.ч. России наблюдается позитивная тенденция к росту интереса к принципам здорового образа жизни и правильному питанию (с 2018 года, спустя пять лет, процент россиян, отдающих предпочтение функциональным продуктам, вырос на 5-7% [16]) [12, 4]. Однако, несмотря на этот сдвиг, потребители могут сталкиваться с проблемой получения точной и актуальной информации о нутриентном составе пищевых продуктов. Выделим следующие категории потребителей, на которых воздействует эта проблема: молодежь, семьи с детьми, пожилое население, население с ОВЗ, спортсмены, трудоспособное население и жители удаленных и труднодоступных регионов РФ [5]. Факторами возникновения описываемой проблемы у представленных групп являются:

- нехватка времени на самообразование в области правильного питания или на приготовление продуктов питания с полноценным нутриентным составом;
- пищевые привычки, заложенные семьей или народными традициями;

- отсутствие знаний или специализированного образования в области науки о питании;

- нехватка финансовых средств на регулярное приобретение полезных продуктов питания;

- влияние агрессивной рекламы и маркетинга отдельных производителей пищевой продукции;

Возникающая в результате воздействия этих факторов проблема приводит к таким последствиям, как нерациональное питание, ведущее к развитию алиментарно-зависимых и хронических заболеваний; уменьшение продуктивности в рабочей деятельности; повышенное психическое напряжение и эмоциональное выгорание; трудности в соблюдении медицинских рекомендаций; экономический ущерб, связанный с нерациональными тратами на пищевые продукты и дальнейшим лечением заболеваний, вызванных неправильным питанием [18]; экономический ущерб государства по причине увеличения количества дней из-за временной нетрудоспособности персонала предприятий и организаций, влекущего рост финансовой нагрузки на Социальный фонд России (по данным Росстата, в 2023 году отмечено 341 650 884 дней вре-

менной нетрудоспособности на все население России) [22].

В последнее время исследуемая проблема активно обсуждается учеными. Так, приводятся понятия «эко-продукта» и «экологического продукта», описывающих натуральные и органические продукты питания, а также указывается, что потребители, при выборе пищевой продукции, отдают наибольшее предпочтение именно этой категории продукции [13]. Исследователи также указывают, что данный вид продукции вызывает недоверие со стороны потребителя из-за отсутствия государственного регулирования и страха приобретения подделки под видом качественной продукции, а также предлагают предприятиям нарастить темпы производства «экопродуктов» для привлечения большего числа потребителей и развития доверия. В контексте физиологического влияния пищевых продуктов на организм человека, актуально исследование, в котором описываются физиологические потребности человека в макро- и микронутриентах, а также минорных биологически активных веществах в рамках концепции нутриома [20]. Нутриом представляет собой совокупность необходимых алиментарных факторов, необходимых для поддержания баланса организма с окружающей средой для обеспечения нормального уровня жизнедеятельности, адаптации и здоровья человека. При этом показатели нутриома должны регулярно пересматриваться при изменении социально-экономического положения, структуры заболеваемости и антропометрических характеристик населения. В рамках анализа спроса населения на продукты питания вызывают интерес данные изучения потребительских предпочтений в выборе пищевых продуктов растительного происхождения для здорового питания на примере жителей Санкт-Петербурга [19]. Отмечается, что в условиях растущего интереса к здоровому образу жизни потребители отдают предпочтение свежим и переработанным фруктам, ягодам и напиткам, таким как соки и нектары. Однако кондитерские изделия из фруктов и ягод, железные изделия не пользуются спросом у потребителя из-за высокого содержания сахара и искусственных пищевых добавок. Основными ориентирами при выборе пищевой продукции у потребителя остаются вкусовые качества, а также лечебно-профилактические свойства.

Таким образом, актуальность исследования предопределена повышением уровня осознанности российских потребителей о нутриентном составе продуктов питания. С практической точки зрения разработка структуры базы данных (БД) нутриентного состава позволит предложить новый подход к хранению и организации такого вида данных, что в свою очередь создаст основу для разработки информационной системы (ИС), обеспечивающей доступ к необходимой информации, а также сервисам поддержки принятия решений на ее основе, открытым для любых социально-демографических групп, стремящихся в получении точной и актуальной информации о нутриентных и потребительских свойствах продуктов питания и

поддержании принципов здорового образа жизни [9]. С исследовательской точки зрения, предлагаемый вариант БД будет также полезен представителям научного сообщества для сбора статистической информации и анализа различных зависимостей по содержащимся данным.

Методология. Целью исследования являлось создание концептуальной модели предметной области и информационной модели хранения данных в рамках разрабатываемой ИС поддержки принятия решений потребителями на основе категорийной классификации пищевых продуктов.

Для достижения поставленной цели, были определены следующие задачи:

1. Провести сравнительную характеристику существующих популярных в исследовательской области БД пищевой ценности продуктов питания, включающую анализ количественных и качественных показателей, а также системных требований.
2. Разработать модель хранения данных, позволяющую детально описать концептуальную схему предметной области.
3. Разработать концептуальную модель ИС подбора нутриентного состава пищевых продуктов на основе физиологических параметров потребителей, определяющую смысловую структуру рассматриваемой предметной области.

Объектом исследования являлись свидетельства о регистрации БД, индексируемые в электронной библиотеке eLibrary.ru. В процессе поиска применялись следующие запросы: «Пищевая ценность продуктов питания»; «Пищевая ценность сырья»; «Пищевая ценность»; «Химический состав продуктов питания». Во время исследования рассматривались свидетельства о регистрации, опубликованные в период с 2013 по 2024 годы. Предметом исследования являлись функциональные возможности исследуемых БД.

Методы, применяемые в процессе решения поставленных задач:

- При сравнении функциональных свойств существующих БД применялись методы анализа, синтеза, систематизации и структурирования информации [2].
- Разработку концептуальной модели, предлагаемой ИС, проводили с использованием методологий структурного анализа и проектирования *SADT* и *IDEF0* [8].
- Разработка модели хранения данных производилась с применением модели «сущность-связь» (ER-модели) [11].

Результаты. 1. Сравнительная характеристика существующих БД пищевой ценности продуктов питания. При анализе структуры существующих БД, содержащих данные о нутриентном составе пищевых продуктов, были рассмотрены их функциональные возможности из свидетельств о регистрации БД с интернет-портала Федерального института промышленной собственности (ФИПС). В результате было выделено двадцать свидетельств с наибольшим числом цитирований. В процессе сравнения исследуемых

материалов были определены их качественные, количественные показатели, а также системные требования.

В таблице 1 представлена часть качественных показателей, включающая в себя сведения о месте

проведения исследования для сбора исходных данных, основное содержание БД, описывающее группы хранимых данных, и нормативные документы, по которым производились структуризация и наполнение БД.

Таблица 1 – Показатели места проводимого исследования и нормативной документации для исследуемых БД

№ свидетельства о регистрации БД	Место исследования	Нормативные документы
2014621436	Школы и ВУЗы	"Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения РФ"
2019620161	-	Сборник рецептов рациона школьного питания
2015621699	-	Справочники видов деятельности, профессий
2021622512	Школы и предприятия общественного питания	СанПиН 2.3/2.4.3590-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения»
2018621955	Омская область	-
2022620947	Муниципальные районы Нижегородской области	-
2023622288	Приморский край	-
2022622539	г. Владивосток	-
2024621145	-	Российская БД химического состава продуктов питания; Международная БД химического состава продуктов питания FAO/ВОЗ; Датская БД химического состава продуктов питания Frida; Индийская БД химического состава продуктов питания Indian Food Composition Tables; Американская БД химического состава продуктов питания USDA FoodData; Австралийская БД химического состава продуктов питания Foodstandarts; Финская БД химического состава продуктов питания Fineli
2015621027	Южная часть России	-
2015620920	Булунский улус, респ. Саха (Якутия)	-
2020622154, 2016621293, 2020621196, 2021622647, 2018620507, 2016620439, 2018620185, 2018621425, 2015620490	-	-

В таблице 2 представлена следующая часть качественных показателей, содержащая сведения о функциональных возможностях работы с БД, методах, применяемых при анализе данных, а также особенностях пищевых продуктов, анализируемые свойства которых хранятся в БД.

В рамках определения количественных показателей исследуемых БД, были выделены такие показатели, как объем исследования, демонстрирующий число респондентов, параметры которых были задействованы в процессе заполнения БД; объем БД, отражающий количество уникальных записей в БД; срок проведения исследования показывает продолжительность сбора и анализа исходных данных перед их загрузкой в рассматриваемую БД; возраст исследования демонстрирует возрастной диапазон респондентов, задействованных при создании БД. Результаты сбора количественной информации представлены в таблице 3.

В ходе анализа системных требований рассматриваемых БД, были выделены такие показатели, как тип реализующей ЭВМ, на котором может быть развернута БД; вид и версия системы управления БД (СУБД); операционная система, на которой возможно развертывание БД; информационный объем БД,

занимаемый в хранилище ЭВМ; год регистрации БД в ФИПС. Результаты анализа продемонстрированы в таблице 4.

Результаты, полученные в ходе анализа выбранных данных, позволят сформировать модель универсальной БД, содержащей личные данные пользователя, а также пищевую ценность и другие потребительские свойства продуктов питания. Полученная модель станет ключевой частью концепции ИС поддержки принятия решений по подбору пищевых продуктов на основе их нутриентного состава.

2. Разработка модели универсального хранилища данных. При создании модели хранения данных использовалась модель «сущность-связь» или ER-модель, позволяющая выделить ключевые сущности предметной области и обозначить связи, которые могут устанавливаться между этими сущностями. Поэтому перед процессом разработки были выделены фундаментальные сущности, составляющие основу предметной области, список которых представлен в таблице 5.

Для завершения описания, далее на рисунке 1 представлена модель хранения данных с вышеперечисленными сущностями и связями между ними.

Таблица 2 – Показатели функциональных возможностей, методов анализа данных и категорий пищевой продукции

№ свидетельства о регистрации БД	Функциональность	Методы анализа данных	Анализируемая пищевая продукция
2014621436	Внесение данных; автофильтры	-	-
2020622154	-	Регрессионный анализ	Многокомпонентные пищевые системы
2019620161	Группировка блюд по названию; выделение данных цветом	-	-
2016621293	-	-	Безлактозные десерты
2020621196	Деперсонификация данных	Частотный метод полуколичественной оценки характера питания	-
2021622647	Хранение, редактирование, добавление, удаление информации о химическом составе продуктов и сырья растительного/животного происхождения; выгрузка отчетов в формате Excel; прямой доступ к данным через язык программирования PL/SQL	-	-
2018620507	-	-	Блюда из овощей
2016620439	-	-	Плодоовощные продукты
2022620947	-	-	Молоко
2018620185	-	-	Говядина
2023622288	-	Анализ частоты потребления пищи	-
2022622539	Прогнозирование потенциальных факторов риска нарушения здоровья обучающихся вузов: физическая активность в течение дня, эмоциональное состояние, соматическая патология, аллергический статус	-	-
2015621027	-	-	Ягоды
2018621425	Поиск и выборка данных	-	Продукты животного происхождения с биопротекторными свойствами
2015620490	Запись, чтение, передача, хранение данных; расчет химического состава многокомпонентных жировых систем; расчет необходимого содержания антиоксидантов с учетом типа используемой эмульсии и жирнокислотного состава жирового продукта	-	Растительные масла; животные жиры
2015620920	-	Опросный метод; частотный метод; метод суточного воспроизведения питания	-
2015621699, 2021622512, 2018621955, 2024621145	-	-	-

Таблица 3 – Количественные показатели исследуемых БД

№ свидетельства о регистрации БД	Объем исследования, (человек)	Объем БД	Срок проведения исследования	Возраст исследования
2014621436	497	-	-	-
2015621699	-	352 продукта, 56 блюд	-	-
2020621196	720	30 нутриентов, 40 показателей респондентов	12 месяцев	25-70 лет
2021622512	-	-	-	7-11 лет, 12+ лет
2018621955	300	60 нутриентов	-	-
2022620947	-	3 таблицы	-	-
2023622288	757	-	-	14-17 лет
2015621027	-	информация по 101 сорту земляники, 52 сортам малины, 20 сортам смородины черной, 26 сортам смородины красной, 23 сортам крыжовника	-	-
2018621425	-	информация о 6 группах продуктов животного происхождения с биопротекторными свойствами	-	-
2015620490	-	-	-	-
2015620920	569	-	-	-
2020622154, 2019620161, 2016621293, 2021622647, 2018620507, 2016620439, 2018620185, 2022622539, 2024621145, 2015620490	-	-	-	-

Таблица 4 – Системные требования исследуемых БД

№ свидетельства о регистрации БД	Тип ЭВМ	Вид и версия СУБД	Операционная система	Размер БД, КБ	Год регистрации
2014621436	IBM PC – совмест. ПК	Excel	Windows 2000/XP/Vista/7	320	2014
2020622154	-	Excel 2010	-	4 332	2020
2019620161	-	Excel 2003	-	1 106	2019
2016621293	IBM PC – совмест. ПК	PowerPoint 2003	Windows 2007/XP/Vista	1 157	2016
2015621699	IBM PC – совмест. ПК с Intel Pentium 1 и выше	Firebird 2.1.3	Windows XP/Vista/7/8	7 250	2015
2020621196	IBM PC – совмест. ПК	Excel	Windows	252	2020
2021622512	IBM PC – совмест. ПК	PowerPoint 2007	Windows XP.SP 2	3 983	2021
2021622647	IBM PC – совмест. ПК	Oracle Database Express Edition	Windows, Mac OS X, GNU/Linux, Android	2 048	2021
2018620507	-	Excel 2010, Word 2010	-	1 425	2018
2018621955	-	Excel	-	983	2018
2016620439	IBM PC – совмест. ПК	PowerPoint 97-2003	Windows 2007/XP/Vista	6 953	2016
2022620947	IBM PC – совмест. ПК	Excel	Windows 7 и выше	60,7	2022
2018620185	-	Access	-	3 584	2017
2023622288	IBM PC – совмест. ПК на базе Pentium IV	Office Excel 2010	Windows 7	30	2023
2022622539	IBM PC – совмест. ПК на базе Pentium IV	Excel 2010	Windows 7	197	2022
2024621145	-	MS Excel	-	537	2024
2015621027	IBM PC – совмест. ПК	Excel	Windows XP	1024	2015
2018621425	-	Microsoft Access 2003	-	1 382,4	2018
2015620490	IBM PC – совмест. ПК	MySQL	Windows, Linux, Mac OS X	45	2015
2015620920	IBM PC – совмест. ПК	SPSS 12.0	Windows XP/Vista/7/8	741,4	2015

Таблица 5 – Список основных сущностей модели хранения данных

Наименование сущности	Краткое описание
Цели	Измеримые цели, которые может выбрать потребитель при работе с ИС
Антропометрические данные	Физиологические показатели потребителя
Пользователи	Аутентификационные данные потребителя в ИС
Цели-Пользователи	Связывает сущности «Пользователи» и «Цели» по внешнему ключу
Пищевая продукция	Основные сведения о продуктах питания, содержащихся в БД
Типы пищевой продукции	Классификация пищевых продуктов по их происхождению
Пищевая продукция-Пользователи	Связывает сущности «Пользователи» и «Пищевая продукция» по внешнему ключу
Состав пищевых продуктов	Содержание других пищевых продуктов или иного сырья в хранящихся продуктах
Жирные кислоты	Содержание НЖК, ПНЖК и холестерина в пищевых продуктах
Макронутриенты	Макронутриентный состав пищевых продуктов
Минеральные вещества	Минеральный состав пищевых продуктов
Витамины	Витаминный состав пищевых продуктов
Другие нутриенты	Содержание прочих органических соединений в пищевых продуктах

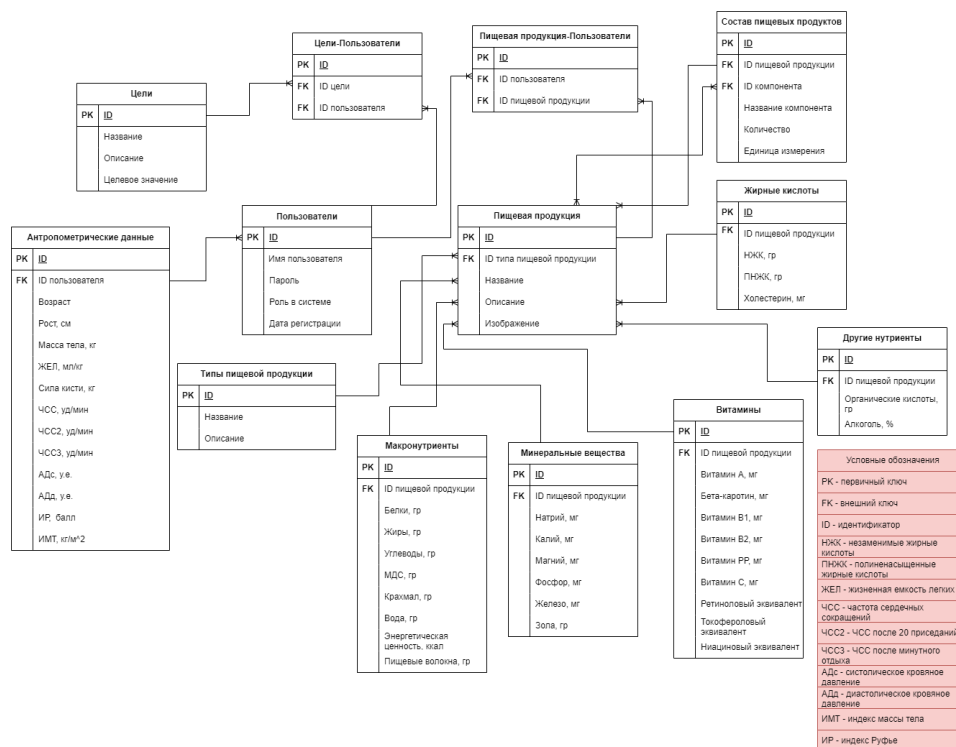


Рисунок 1 – Схема модели хранения данных

3. Разработка концептуальной модели ИС. Концептуальная модель ИС представляет собой абстрактное описание структуры системы, включающее определение свойств ее компонентов и связей между ними [3]. Создание концептуальной модели не требует применения конкретных нотаций моделирования, позволяя описать модель вербально, графически или при помощи специализированных методов моделирования, наиболее подходящих для ее реализации. В рамках данного исследования была разработана концептуальная модель предложенной ИС с использованием методологии *IDEF0* (рис. 2), которая представляет собой стандарт функционального моделирования бизнес-процессов при помощи набора взаимосвязанных блоков и является составной частью методологии

SADT, описывающей процесс интеграции процесса моделирования, управления конфигурацией проекта, использования дополнительных языковых средств и руководства проектом. В качестве альтернативы *IDEF0* можно рассматривать унифицированный язык моделирования *UML* [7], однако последний преимущественно используется для детального описания бизнес-процессов и документирования ИС в пространственно-временном контексте, что избыточно при построении концептуальной модели. *IDEF0*, в свою очередь, описывает бизнес-процессы, протекающие в системе в виде логически связанных, функциональных блоков, рассматривающих отношения между функциональностью ИС, что наиболее релевантно при проектировании информационной системы [1].

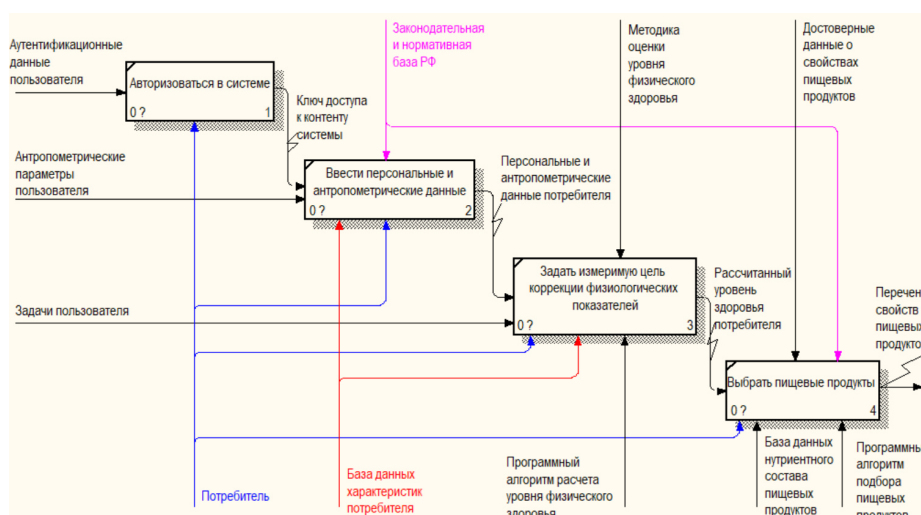


Рисунок 2 – Концептуальная модель ИС

Выбор компонентов концептуальной модели ИС осуществлялся с учетом предметной области пищевых систем, а также поставленной проблемы исследования.

Обсуждение. При организации проведения анализа существующих баз данных в области пищевой ценности опирались на следующие принципы: поиск и сбор информации из открытых источников, структурирование, сравнительная оценка качественных и количественных показателей. Применяемые принципы позволяют отметить комплексность подхода проведенного анализа. Оценку исследуемых баз данных проводили с учётом дифференциации представленной в них информации на качественные и количественные показатели.

При рассмотрении содержания анализируемых БД (табл. 2) выявлены следующие категории хранящихся данных: антропометрические показатели индивида; суточная потребность в нутриентах для разных социально-демографических групп населения; химический состав и пищевая ценность сырья растительного и животного происхождения, продовольственных товаров и блюд (содержание макро- и микронутриентов, энергетическая ценность); технологические схемы приготовления продукции; требования к качеству, показатели качества (в т.ч. органолептические) и безопасности сырья и пищевых продуктов; пищевые привычки (стереотипы питания); масса продуктов и блюд (выход); потери и отходы при механической и тепловой обработке; классификация сырья и продовольственных товаров; технические и физико-химические показатели плодов. Изучение описания и состава БД (табл. 1) позволило отметить, что только в 5 анализируемых БД отмечено использование правовой и справочной информации. В ряде БД дополнительно используются перечисленные далее методы анализа массивов информации: регрессионный анализ, частотный метод полуколичественной оценки характера питания, анализ частоты потребления пищи, опросный метод, метод суточного воспроизведения питания. Установлено значительное разнообразие объектов анализа в исследуемых БД. Среди сырья и продуктов животного происхождения можно выделить говядину, продукты с биопротекторными свойствами, молоко, безлактозные десерты, животные жиры; среди сырья и продуктов растительного происхождения – плодоовощные продукты, ягоды, растительные масла, блюда из овощей и другие многокомпонентные пищевые системы.

В таблице 3 систематизированы эмпирические сведения в отношении следующих количественных показателей: объём исследования, объём (величина) БД, сроки проведения исследования, возраст (объектов) исследования. Первый показатель отражал количество индивидов, в отношении которых в случае необходимости разработчиками БД были собраны и систематизированы массивы информации.

Можно отметить, что диапазон данного показателя составил 300...757 человек. Параметр «Объём БД» включал в себя количество наименований пищевых продуктов и/или блюд, а также общее количество нутриентов (макро- и микронутриентов), для которых, собственно, и создавалась БД. Показатель «Сроки проведения исследования», характеризует период сбора информации для БД. Отмечен лишь в одной БД. Критерий «Возраст исследования», связанный с возрастом индивидов, в отношении которых составлялась БД. Отмечены разные возрастные группы детей и трудоспособного населения.

Проведя сравнительную характеристику системных требований БД, представленных в анализе (табл. 4), было установлено, что наиболее популярным типом ЭВМ является *IBM PC* – совмест. ПК (10 наименований БД в сравнительной таблице). Популярность данного типа обуславливается универсальностью описания стандартного ПК, построенного на базе процессоров *Intel* или *AMD*, без необходимости указания его архитектурных особенностей. Следующими по популярности идут следующие типы ЭВМ: *IBM PC* – совмест. ПК на базе *Pentium IV* (2 наименования), *IBM PC* – совмест. ПК с *Intel Pentium 1* и выше (1 наименование). Данные типы ЭВМ дополнительно имеют описание процессора и его поколения, необходимые для обеспечения корректной работы БД. Остальные 7 анализируемых БД не имеют описания требуемого типа ЭВМ ввиду необязательности указания данного параметра, либо сокрытия данных. При сравнении используемых СУБД и их версий в системных требованиях БД, самой популярной версией стала программа для работы с электронными таблицами – *Microsoft Excel* различных версий (11 наименований БД). Исходя из терминологии, СУБД – это приложение или комплекс приложений, обеспечивающих управление БД в контексте доступа, добавления, изменения и удаления данных. Таким образом, применение электронных таблиц *Excel* в данном случае оправдано ввиду удовлетворения критериям СУБД, и более привычному процессу по управлению данными, чем в специализированных программных СУБД. Однако использование *Excel* как СУБД имеет ограничения. Она не соответствует принципам реляционной алгебры, что затрудняет её применение в сложных корпоративных информационных системах и в задачах по комплексной обработке данных. Далее по популярности представлены реляционные СУБД (РСУБД): *Firebird 2.1.3* (1 наименование), *Oracle Database Express Edition* (1 наименование), *Microsoft Access* (2 наименования), *MySQL* (1 наименование). Отметим, что РСУБД имеют ряд факторов, которые выгодно отличают их от других типов СУБД: масштабируемость, обусловленная способностью хранить и обрабатывать значительно большие объёмы данных; одновременный доступ, характеризующийся возможностью многопользовательской работы с БД в реальном времени. При этом в РСУБД реали-

зованы механизмы, обеспечивающие целостность информации и предотвращение конфликтов при одновременном редактировании; механизмы безопасности данных, представленные в виде управления доступа пользователей, шифрования и восстановления после сбоев; выполнение сложных запросов к данным посредством специализированного языка запросов СУБД – *SQL*; механизмы целостности данных, контроля изменений, резервного копирования и восстановления [13]. Однако данные факторы имеют свои недостатки, связанные с невысокой производительностью РСУБД при работе с большими объемами данных, сложностью создания и изменения структуры таблиц и ограниченностью в работе с неструктурированными данными. Выбор производителя РСУБД определяется такими факторами, как стоимость предоставляемого программного обеспечения (ПО), системные требования к оборудованию, масштабируемость, поддерживаемые типы данных и др. Следующим приложением в качестве СУБД по популярности является *Microsoft PowerPoint* разных версий (*PowerPoint 97-2003*, 2007) в количестве 3 наименований, поскольку оно также удовлетворяет минимальным условиям, подходящим для СУБД. В качестве самых мало употребляемых СУБД представлены текстовый процессор *Microsoft Word* (1 наименование) и программа для статистической обработки данных *SPSS* версии 12.0 (1 наименование). При проведении анализа операционных систем (ОС) в системных требованиях к рассматриваемым БД было определено, что все БД, в которых заявлено требование к ОС, имеют поддержку ОС *Microsoft Windows* различных версий (13 наименований). На текущий момент актуальной версией *Windows* является *Windows 11*. В представленном анализе заявлена поддержка всех версий ОС *Windows* только в трех БД, а в остальных случаях имеется поддержка ОС *Windows 8* и ниже (11 наименований), уже неподдерживаемых компанией *Microsoft*. Стоит отметить, что пять БД с поддержкой устаревших версий ОС были зарегистрированы после выпуска первой поддерживаемой на текущий момент *Windows 10*, а именно 2015 года. Отсутствие поддержки актуальных версий ОС *Windows* не дает гарантии корректной функциональности БД на них. Помимо этого, в анализе присутствуют две БД, поддерживающие кроссплатформенность с несколькими ОС, такими как *Windows*, *GNU/Linux*, *Mac OS X* и *Android*, что расширяет их пользовательскую базу. Семь рассматриваемых БД не имеют требований к ОС. Связано это с необязательностью указания данного параметра при регистрации, либо с сокрытием данных. В ходе анализа информационного размера рассматриваемых БД было выявлено, что минимальный размер составляет около 0,03 МБ, а максимальный – 7,08 МБ. Информационный размер БД характеризует количество и типы данных, которые в ней содержатся. При анализе года регистрации БД было обнаружено,

что все БД входят в рассматриваемый диапазон 2014–2024 гг., при этом одна БД зарегистрирована в 2024 г. и одна в 2014 г.

В ходе систематизации полученных данных была сформирована *ER*-модель БД (рис. 1), структурно схожая с анализируемыми объектами и универсальная для разных социально-демографических групп населения. Сущности в разработанной модели условно можно разделить на следующие группы:

- Пользовательские данные – содержат аутентификационные данные пользователей, а также их антропометрические и персональные данные (сущности «Антропометрические данные», «Цели», «Пользователи», «Цели-Пользователи»);

- Данные о пищевых продуктах – содержат данные о нутриентных и потребительских свойствах продуктов питания и сведения об их подборе для пользователей (сущности «Пищевая продукция», «Типы пищевой продукции», «Пищевая продукция-Пользователи», «Состав пищевых продуктов», «Жирные кислоты», «Макронутриенты», «Минеральные вещества», «Витамины», «Другие нутриенты»).

Связи между сущностями описывают логические взаимоотношения между ними через внешние ключи, по которым осуществляется привязка.

Была разработана концептуальная модель (рис. 2), которая описывает основные бизнес-процессы ИС, а также ресурсы, благодаря которым будет осуществляться ее функционирование. Также планируется создание программной среды для специализированной ИС подбора нутриентного состава пищевых продуктов на основе физиологических параметров потребителей.

На первом шаге пользователь (потребитель) авторизуется в ИС, используя свои аутентификационные данные и получает ключ доступа к программным сервисам.

Далее пользователь вводит свои персональные и антропометрические показатели, которые записываются в отдельную таблицу БД для дальнейших рекомендательных расчетов. При вводе и сохранении пользовательских данных учитываются требования ст. 1235 ГК РФ [21], регламентирующей правила использования ИС потребителями и № 152-ФЗ "О персональных данных" [14], предписывающих получение согласия пользователя на сбор и обработку вводимых данных; использование собираемых данных для заранее определенных целей; обеспечение защиты данных от несанкционированного доступа, утраты, изменения или распространения; возможность уведомления пользователя об использовании собственных данных, а также их редактирования или удаления; получение дополнительного согласия на сбор и обработку биометрических данных и, наконец, уведомление Роскомнадзора об обработке персональных данных в ИС.

Следующим шагом пользователь выбирает измеримую цель, которая ляжет в основу расчета индивидуальных рекомендаций при выборе пищевых

продуктов.

Расчет осуществляется на основе введенных персональных и антропометрических показателей, с применением общедоступной методики оценки уровня физического здоровья [17] и программного алгоритма, разработанного с учетом этой методики.

Результаты выбора цели и расчетов записываются в часть БД, содержащую пользовательские данные.

В результате выбранной цели и рассчитанного уровня физического здоровья потребителя осуществляется подбор оптимальных продуктов питания в соответствие с официальными и достоверными источниками о свойствах пищевых продуктов [23], а также ФЗ-149 «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [15], предписывающего обеспечение достоверности используемых данных. В процессе создания рекомендации используется программный алгоритм, основанный на применении методов машинного обучения с применением алгоритмов классификации и регрессии [6], и данные из БД о нутриентном составе и других потребительских свойствах пищевых продуктов. На выходе информационная система выдает потребителю набор пищевых продуктов, оптимальный по нутриентному составу его индивидуальным характеристикам.

Выводы. В ходе анализа двадцати наиболее цитируемых свидетельств о регистрации БД пищевой ценности продуктов питания, были выявлены различия в их структуре, функциональных возможностях, количественных показателях и системных требованиях. На основе полученных результатов планируется создание универсальной базы данных для информационной системы поддержки принятия решений по подбору пищевых продуктов;

Модель универсального хранилища данных была разработана на основе *ER*-модели, где были выделены ключевые сущности предметной области и установлены связи между ними. Итоговая модель представлена в виде схемы, отображающей эти сущности и взаимосвязи.

Концептуальная модель информационной системы была разработана с использованием методологии *IDEF0*, представляющей структуру системы через набор взаимосвязанных блоков. Выбор этой методологии обусловлен её релевантностью для проектирования информационных систем в контексте пищевых систем.

В рамках дальнейшего исследования планируется программная реализация БД пищевой ценности продуктов питания в соответствии с представленной моделью и специализированной ИС, основанной на разработанной БД, их сравнение с конкурентными программными решениями, тестирование с учетом актуальных принципов, а также внедрение в корпоративную среду с целью анализа практической и научной пользы новых программных решений для потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Baiyere, A., Salmela, H., & Tapanainen, T. (2020). Digital transformation and the new logics of business process management. *European Journal of Information Systems*, 29(3), 238-259. <https://doi.org/10.1080/0960085X.2020.1718007>.
2. Berger, J., Humphreys, A., Ludwig, S., Moe, W.W., Netzer, O., & Schweidel, D.A. (2020). Uniting the Tribes: Using Text for Marketing Insight. *Journal of Marketing*, 84(1), 1-25. <https://doi.org/10.1177/0022242919873106>.
3. Butt, J. (2020). A Conceptual Framework to Support Digital Transformation in Manufacturing Using an Integrated Business Process Management Approach. *Designs*, 4(3), 17. <https://doi.org/10.3390/designs4030017>.
4. Caradonna, F.; Consiglio, O.; Luparello, C.; Gentile, C. Science and Healthy Meals in the World: Nutritional Epigenomics and Nutrigenetics of the Mediterranean Diet. *Nutrients* 2020, 12, 1748. <https://doi.org/10.3390/nu12061748>.
5. Guzenina, S.V.E. Nutrition culture in Russia: traditions and modernity / S.V.E. Guzenina, M.V. Sukhomlinova // *Этнокультурное единство и многообразие. Хрестоматия: Учебное пособие / Сост. и науч. редактор С.В. Гузенина, вступ. статья А.Л. Маршак. – Тамбов: Издательский дом "Державинский", 2021. – Р. 35-46. – EDN QFRBGX*.
6. Malti Bansal, Apoorva Goyal, Apoorva Choudhary, A comparative analysis of K-Nearest Neighbor, Genetic, Support Vector Machine, Decision Tree, and Long Short Term Memory algorithms in machine learning, *Decision Analytics Journal*, Volume 3, 2022, 100071, ISSN 2772-6622, <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100071>.
7. Mert Ozkaya, Ferhat Erata, A survey on the practical use of UML for different software architecture viewpoints, *Information and Software Technology*, Volume 121, 2020, 106275, ISSN 0950-5849, <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106275>.
8. Mora, M., Adelakun, O., Galvan-Cruz, S., & Wang, F. (2021). Impacts of IDEF0-Based Models on the Usefulness, Learning, and Value Metrics of Scrum and XP Project Management Guides. *Engineering Management Journal*, 34(4), 574-590. <https://doi.org/10.1080/10429247.2021.1958631>.
9. Sorokina, M., Steinbeck, C. Review on natural products databases: where to find data in 2020. *J Cheminform* 12, 20 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13321-020-00424-9>.
10. Thomer, A.K., & Wickett, K.M. (2020). Relational data paradigms: What do we learn by taking the materiality of databases seriously? *Big Data & Society*, 7(1). <https://doi.org/10.1177/2053951720934838>.
11. Vassilis Christophides, Vasilis Efthymiou, Themis Palpanas, George Papadakis, and Kostas Stefanidis. 2020. An Overview of End-to-End Entity Resolution for Big Data. *ACM Comput. Surv.* 53, 6, Article 127 (November 2021), 42 pages. <https://doi.org/10.1145/3418896>.
12. Аникина, А.Н. Популяризация здорового питания в современном обществе / А.Н. Аникина, Д.В. Логинов // *Физическое воспитание, спорт, физическая реабилитация и рекреация: проблемы и перспективы развития: Материалы XIII Международной научно-практической конференции, Красноярск, 15 июня 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 324-327. – EDN GVQGX1*.
13. Голубев, В.С. Здоровое питание: восприятие, динамика, популяризация / В.С. Голубев, М.И. Беркович // *Теоретическая экономика. – 2020. – № 3(63). – С. 98-104. – EDN TNGSRM*.
14. Дыбова, А.К. Ш.Ф.А. К вопросу Об особенностях современного законодательства по защите персональных данных (взгляд юриста-практика) / А.К. Ш.Ф.А. Дыбова // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Юриспруденция. – 2020. – № 4. – С. 133-138. – DOI 10.18384/2310-6794-2020-4-133-138. – EDN LOXXGZ*.
15. Железняк, Н.С. Об особенностях административно-правового регулирования запрета на оборот недостоверной общественно значимой информации / Н.С. Железняк, К.Д. Рыдченко // *Вестник Краснодарского университета МВД России. – 2023. – № 3(61). – С. 94-99. – EDN CNUFND*.
16. Как изменилось отношение россиян к здоровому питанию за пять лет // РБК URL: <https://www.rbc.ru/economic>

s/30/07/2024/66a7616e9a794740b342420e (дата обращения: 14.12.2024).

17. Кетоев, К.Э. Методика оценки физического развития детей среднего школьного возраста / К.Э. Кетоев, А.Н. Доева. – Владикавказ : Олимп, 2020. – 30 с. – ISBN 978500081005. – EDN TLUFQX.

18. Муканеева, Д.К. Медико-экономический ущерб и обоснование мер популяционной профилактики нерационального питания в Российской Федерации: дис. ... канд. мед. наук: 14.02.03 / Д.К. Муканеева. – М., 2024. – 177 с.

19. Неделько, А.Ю. Потребительский выбор продуктов питания: факторы, текущее состояние и ожидаемые изменения / А.Ю. Неделько, О.А. Третьяк, А.Ю. Лаврова // Российский журнал менеджмента. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 605-642. – DOI 10.21638/spbu18.2020.406. – EDN FXUUKA.

20. Нутриом как направление "главного удара": определение физиологических потребностей в макро- и микронутриентах, минорных биологически активных веществах пищи / В.А. Тутельян, Д.Б. Никитюк, А.К. Батурич [и др.] // Вопросы питания. – 2020. – Т. 89, № 4. – С. 24-34. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10039. – EDN IXUPAM.

21. Оценка условий и безопасности труда в производственной деятельности предприятий / И.Н. Кравченко, Е.В. Кулакова, И.В. Алибекова, Ю.В. Величко // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 5(269). – С. 17-22. – EDN HDIHDI.

22. Ровный, В.В. О государственной регистрации договора и последствия договора / В.В. Ровный // Сибирский юридический вестник. – 2022. – № 2(97). – С. 80-87. – DOI 10.26516/2071-8136.2022.2.80. – EDN XQQHFR.

23. Тутельян В.А., Долгушкин Н.К., Никитюк Д.Б. Химический состав российских пищевых продуктов. – 3-е изд. – М.: ДеЛи, 2024. – 193 с.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 664.959.5:665.939.12

EDN: MIYNFU

**БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ БЕЛКОВОГО ПОРОШКА ИЗ РЫБНЫХ
ОТХОДОВ: ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9202-4435

AuthorID: 776770

ORCID: 0000-0002-3085-6577

ResearcherID: AAS-2373-2020

ScopusID: 57214721433

ЕСЕПЕНОК Константин Викторович, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: kv@esepenok.ru)*

SPIN: 7950-5466

AuthorID: 776862

ORCID: 0000-0003-3654-4440

ResearcherID: L-1594-2018

ScopusID: 57220034797

ГОРБАЧЕВА Мария Владимировна, доктор технических наук,

доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: gmv76@bk.ru)*

SPIN: 3135-2987

AuthorID: 778112

ORCID: 0000-0002-1271-4030

ResearcherID: HKW-3549-2023

ScopusID: 57220032548

ШАГАЕВА Наталья Николаевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: nata-shag@yandex.ru)*

SPIN: 1081-3891

AuthorID: 776856

ORCID: 0009-0003-7498-273X

ScopusID: 57830091500

ЗЕМЦОВА Людмила Константиновна, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Технологии и управления качеством продукции АПК имени С.А. Каспарьянца»

*Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА им. К.И. Скрябина
(109472, Россия, Москва, ул. Академика Скрябина, д.23, e-mail: zemcova-l@yandex.ru)*

Аннотация. Статья посвящена исследованию аминокислотного состава и биологической ценности белка рыбного порошка, полученного из рыбных хвостовых плавников с прирезами мышечной ткани, для подтверждения преимуществ его использования в пищевых целях. Цель исследования – проанализировать аминокислотный состав и биологическую ценность белка рыбного порошка. Задачи исследования: провести органолептическую и физико-химическую оценку качества, исследовать микробиологическую безопасность, аминокислотный профиль и биологическую ценность белка рыбного порошка. В качестве объектов исследования были использованы образцы рыбного порошка, выработанные по экспериментальной технологии из рыбных хвостовых плавников с прирезами мышечной ткани. В ходе исследования были применены методы: органолептический, метод количественного определения основных нутриентов (физико-химический), микробиологический и высокоэффективной жидкостной хроматографии. Физико-химический анализ качества подтвердил, что рыбные отходы – это высокобелковый продукт, содержащий 83,46% белка. Полученные соотношения белковых и жировых веществ исследуемого рыбного порошка указывают на целесообразность его применения в качестве пищевого ингредиента с энергетической ценностью – 448 ккал / 1876 кДж. В исследуемом белке идентифицированы все незаменимые аминокислоты, на долю которых приходится не менее 40,0 %. Содержание условно незаменимых заменимых и заменимых составило соответственно – 7,30% и 65,90% от общего количества аминокислот. При этом, незаменимые аминокислоты к заменимым находятся в соотношении 1:1,6, что позволяет говорить о качестве белка и его легкости переваривания. Проведенный комплекс исследований и полученные результаты доказывают высокую биологическую эффективность предлагаемого порошка из рыбных отходов (рыбные хвостовые плавники с прирезами мышечной ткани), что дает основание рекомендовать его как компонент в

рецептуре обогащенных комбинированных продуктов питания.

Ключевые слова: рыбные отходы, рыбный порошок, биологическая ценность, белок, нетрадиционные сырьевые ресурсы.

BIOLOGICAL VALUE OF PROTEIN POWDER FROM FISH WASTE: ADVANTAGES OF USE

© The Author(s) 2025

ESEPENOK Konstantin Viktorovich, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of “Technology and quality management of agricultural products named after S.A. Kasparyants”
Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin
(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: kv@esepенок.ru)

GORBACHEVA Mariya Vladimirovna, doctor of technical sciences, associate professor of the Department of “Technology and Quality Management of Agricultural Products named after S.A. Kasparyants”
Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin
(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: gmv76@bk.ru)

SHAGAEVA Natalya Nikolaevna, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of “Technology and Quality Management of Agricultural Products named after S.A. Kasparyants”
Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin
(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: nata-shag@yandex.ru)

ZEMTSOVA Lyudmila Konstantinovna, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of “Technology and quality management of agricultural products named after S.A. Kasparyants”
Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology - MVA n.a. K.I. Skryabin
(109472, Russia, Moscow, Akademika Skryabin St. 23, e-mail: zemcova-l@yandex.ru)

Abstract. The article is devoted to the study of amino acid composition and biological value of protein of fish powder, obtained from fish tail fins with cuts of muscle tissue, to confirm the advantages of its use for food purposes. The aim of the study is to analyze the amino acid composition and biological value of fish powder protein. Objectives of the study: to conduct organoleptic and physico-chemical quality assessment, to investigate the microbiological safety, amino acid profile and biological value of protein fish powder. As objects of the study were used samples of fish powder, developed by experimental technology from fish tail fins with cuts of muscle tissue. In the course of the study were applied methods: organoleptic, method of quantitative determination of basic nutrients (physico-chemical), microbiological and high-performance liquid chromatography. Physico-chemical quality analysis confirmed that fish waste is a high-protein product containing 83.46% protein. The obtained ratios of protein and fat substances of the investigated fish powder indicate the feasibility of its application as a food ingredient with energy value – 448 kcal / 1876 kJ. In the investigated protein all essential amino acids were identified, the share of which is not less than 40.0 %. The content of conditionally indispensable substituted and substituted amino acids amounted to 7.30% and 65.90% of the total amount of amino acids, respectively. At the same time, essential amino acids to substituted amino acids are in the ratio of 1:1.6, which allows us to talk about the quality of protein and its ease of digestion. The conducted complex of researches and the received results prove high biological efficiency of the offered powder from fish wastes (fish tail fins with cuts of muscle tissue) that gives the basis to recommend it as a component in the formulation of enriched combined foodstuffs.

Keywords: fish waste, fish powder, biological value, protein, non-traditional raw material resources.

Для цитирования: Есепенок К.В. Биологическая ценность белкового порошка из рыбных отходов: преимущества использования / К.В. Есепенок, М.В. Горбачева, Н.Н. Шагаева, Л.К. Земцова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 79-85. – EDN: MIYNFU.

Введение. В настоящее время наиболее важной проблемой в области здорового питания является дефицит полноценного белка, что во многом предопределено нехваткой сырьевых ресурсов, универсальным рационом, нерегулярным употреблением пищевых продуктов, богатых белком, веганством [1, 10, 15].

Несмотря на то, что сегодня отечественными учеными наработан немалый опыт по увеличению производства пищевого белка и внедрению новых рецептур обогащенных продуктов питания, вопросы по совершенствованию и интенсификации традиционных способов получения ценных биоактивных компонентов продолжают быть актуальными и значимыми. Немаловажным при этом становится

вовлечение в хозяйственный оборот вторичного сырья и отходов животного происхождения, представляющие собой многокомпонентную систему различного целевого назначения [2, 16-18, 22, 28].

Рыбные отходы – нетрадиционный сырьевой ресурс, содержащий ряд биологически ценных соединений, обладающих максимальной доступностью белка, что дает основание рассматривать его как дополнительный источник полноценного белка в пищевых продуктах [4, 6, 9, 11, 28].

В последние годы значительно расширились сведения и исследования в области рециклинга отходов. Так разработаны мало- и безотходные технологии, освоены новые способы их рационального использования [23, 26]. Наибольшее распростра-

нение в промышленности для переработки рыбных отходов получили следующие способы: сушки при атмосферном давлении и вакууме; прессово-сушильный с использованием и без использования, полученного в процессе бульона; экстракционный, ферментативный гидролиз, центрифугионно-сушильный [5, 8, 12, 13, 21, 24-27]. Учитывая, что на качество и пищевую ценность конечного продукта существенное влияние оказывает технология обработки, исследования химического состава, безопасности и аминокислотного состава, полученного из рыбных отходов белкового порошка, представляет научный и практический интерес [9].

Методология. Цель исследования – проанализировать аминокислотный состав и биологическую ценность белка рыбного порошка для подтверждения преимуществ его использования в пищевых целях. Для достижения поставленной цели в рамках данной работы поставлены следующие задачи: провести органолептическую и физико-химическую оценку качества, исследовать микробиологическую

безопасность, аминокислотный профиль и биологическую ценность белка рыбного порошка. Объектами исследования служил белковый порошок (рис. 1), выработанный по экспериментальной технологии (рис. 2) из рыбных хвостовых плавников с прирезами мышечной ткани.

Технология получения белкового порошка из рыбных отходов приведена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Белковый порошок, полученный из рыбных отходов (фото Есепенок К.В.)

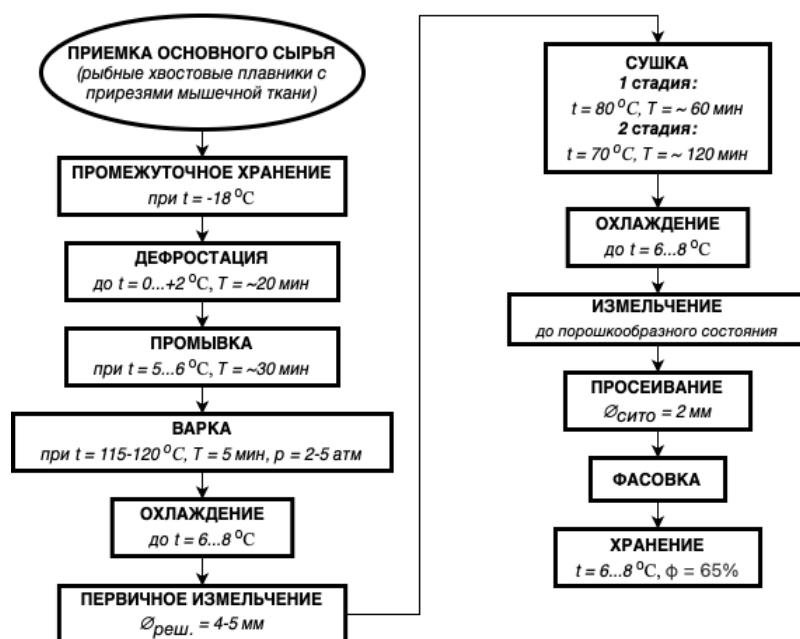


Рисунок 2 – Структурная схема получения белкового порошка из рыбных отходов (составлено авторами)

В ходе работы были использованы общепринятые и современные методы исследования. Органолептические и физико-химические исследования проводили по ГОСТ 33692-2015. Микробиологические исследования рыбного порошка выполняли по ГОСТ 25311-82 «Мука кормовая животного происхождения. Методы бактериологического анализа». Аминокислотный состав опытных образцов определяли согласно МВИ.МН 1363-2000 «Методика по определению аминокислот в продуктах питания с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии» (свидетельство об аттестации N 236/2002 от 06.03.2002). Биологическую ценность белка в порошке устанавливали расчетным путем по методу Х. Митчеля и Р. Блока.

Результаты. Физиологическая ценность рыбы в питании обусловлена сбалансированным составом структурных биоактивных компонентов: таких как ненасыщенные жирные кислоты, минеральные вещества и полноценные белки мышечной ткани, оказывающие благотворное воздействие на организм человека. Так включение в рацион рыбы способствует нормализации обмена веществ и снижению рисков сердечно-сосудистых заболеваний, нарушений кроветворения, а также повышенной сопротивляемости организма к инфекциям [3, 7, 19-21]. Вышеизложенное в полной мере относится и к рыбным отходам после надлежащей их переработки. Для обоснования возможности и преимуществ использования в пищевых целях как источника белка

полученного рыбного порошка была проведена его органолептическая оценка, исследован химический состав и микробиологические показатели.

Визуальная оценка органолептических показателей качества опытного белкового порошка показала, что образец по внешнему виду сыпучий мелкий порошок без плотных комков, цвет от светло-коричневого до коричневого. При просеивании проходит через сито с размером отверстий 2-3 мм. Запах – свойственный данному виду продукта, без посторонних запахов.

Исследования микробиальной чистоты белкового порошка показали, что в образце количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (не более 5×10^3 КОЕ/г) не превышает допустимых пределов. Анаэробных бактерий, сальмонелл и бактерий группы кишечной палочки обнаружено не было, что отвечает требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции».

Результаты физико-химических исследований опытных образцов белкового порошка представлены на рисунке 3.

Как видно из полученных данных (рис. 3), в опытном образце определено высокое содержание белка – 83,46%. Массовая доля влаги и золы составили 2,39% и 1,45%, соответственно. Обращает на себя внимание относительно высокое количество жировых веществ – 12,7, что, вероятно, обусловлено отсутствием процесса обезжиривания и наличием прирезей мышечной ткани в исходном сырье. Посторонних примесей в белковом порошке не обнаружено.

Полученные соотношения белковых и жировых веществ исследуемого продукта указывают на целесообразность его применения как пищевого ингредиента, что также подтверждают данные энергетической ценности (448 ккал / 1876 кДж) и аминокислотного состава белкового порошка (табл. 1).

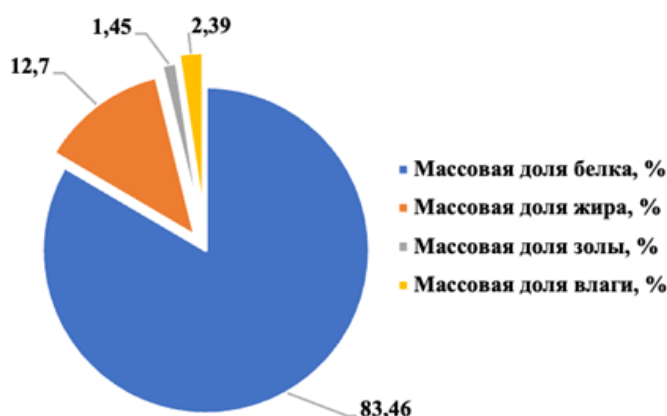


Рисунок 3 – Физико-химические исследования опытного образца белкового порошка

Таблица 1 – Аминокислотный профиль белкового порошка (содержание аминокислот приведено в пересчете на 100 г белка) *

Показатель	Результат испытания	% к $\sum$ аминокислот
	г/100 г	
Лизин*	3,99	7,11
Метонин*	0,01	0,02
Цистеин	0,82	1,46
Аланин	4,11	7,32
Аргинин	2,57	4,58
Аспарагиновая кислота	5,98	10,65
Валин*	0,67	1,19
Гистидин	1,05	1,87
Глицин	6,70	11,93
Глутаминовая кислота	10,04	17,88
Изолейцин*	0,39	0,69
Лейцин*	2,78	4,95
Пролин	1,68	2,99
Серин	2,34	4,17
Тирозин	0,99	1,76
Треонин*	9,78	17,42
Триптофан*	1,73	3,08
Фенилаланин*	0,51	0,91

Примечание: * незаменимые аминокислоты

Определено, что аминокислотный профиль белкового порошка представлен 18 аминокислотами. В исследуемом белке идентифицированы все незаменимые аминокислоты: лизин, метионин, изолейцин, лейцин, треонин, фенилаланин, триптофан и валин, на долю которых приходится не менее 40,0%. Содержание условно незаменимых заменимых и заменимых составило соответственно – 7,30% и 65,90% от общего количества аминокислот. При этом, незаменимые аминокислоты к заменимым находятся в соотношении 1:1,6, соответственно можно говорить о качестве белка и его легкости переваривания.

Кроме того, сумма лейцина, фенилаланина и лизина в белке составляет 83,3% от суммы незаменимых аминокислот (НАК), что свидетельствует о целесообразности использования данного продукта в составе рецептур пищевых продуктов. Из заменимых

аминокислот преобладающая – треонин (9,78 г/100г).

Следует отметить, что опытный образец содержит такие физиологически важные аминокислоты, как аспарагиновая (5,98 г/100 г белка), глутаминовая (10,04 г/100 г белка) кислоты, аланин (4,11 г/100 г белка) и глицин (6,70 г/100 г белка). Известна их активная роль в обмене веществ, укреплении иммунной системы и удалении из организма продуктов распада. Аспарагиновая кислота также участвует в процессе формирования аминокислот, способствует транспортировке минералов и выработке иммунной системой антител против вирусов и бактерий.

Далее для более полной качественной оценки белка и доказательств его биологической ценности были рассчитаны аминокислотный скор и показатель утилитарности в сравнении с эталонным белком ФАО/ВОЗ. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Биологическая ценность белка рыбного порошка *

Показатель	Результат испытания			Эталонный белок, г/100 г белка (A _э) **
	Содержание НАК, г/100 г белка (A _п)	C _п , %	ΔPAC, %	
Лизин	3,99	83,13	77,23	4,8
Метионин + цистеин	0,83	36,09	30,19	2,3
Изолейцин	0,39	13,00	7,10	3,0
Лейцин	2,78	45,57	39,67	6,1
Треонин	9,78	391,20	385,30	2,5
Фенилаланин + тирозин	1,50	36,59	30,69	4,1
Триптофан	1,73	262,12	256,22	0,6
Валин	0,67	16,75	10,85	4,0
ИТОГО:	21,67	-	837,24	27,46
Коэффициент различия аминокислотного сора, K _{рас} , %	38,64			
Биологическая ценность (БЦ), %	61,36			
Коэффициент утилитарности аминокислотного состава U, дол. ед.	0,45			
* составлено авторами				
** по данным ФАО/ВОЗ, 2013 год				

Для расчета аминокислотного сора сопоставляли содержание каждой незаменимой аминокислоты в рыбном порошке с ее содержанием в «идеальном» белке. В ходе расчетов изолейцин отнесен к лимитирующей аминокислоте (скор менее 15%). Зафиксировано, что такие незаменимые аминокислоты как треонин (391,20%) и триптофан (262,12%), скор которых превышает 100%, содержатся в избытке по сравнению с их оптимальным количеством. Можно предположить, что остаток от конвертируемой части данных аминокислот будет расходоваться организмом на энергетические нужды.

Кроме того, нельзя не отметить, высокий аминокислотный скор лизина – 83,13%. Что касается других незаменимых аминокислот, то их скоры не превышали 46%.

Обсуждение. Результаты исследования рыбного порошка показывают, что содержание жировых веществ – 12,7%, вероятно, обусловлено отсутствием процесса обезжиривания и наличием прирезей мышечной ткани в исходном сырье. Суммарное количество лейцина, фенилаланина и лизина в белке

составляет 83,3 %, что позволяет говорить о целесообразности использования данного продукта в составе рецептур пищевых продуктов. Повышенное содержание треонина и триптофана в рыбном порошке позволяет предположить, что остаток от конвертируемой части данных аминокислот будет расходоваться организмом на энергетические нужды. Следует также отметить, что преимущество использования экспериментальной технологии получения рыбного порошка будет заключаться в снижении объемов отходов рыбной промышленности, что в свою очередь позитивно отразится на окружающей среде и будет соответствовать принципам циркулярной экономики.

Выводы. Использование экспериментальной технологии для переработки рыбных отходов позволяет получать мелкий рассыпчатый рыбный порошок, от светло-коричневого до коричневого цвета, с энергетической ценностью 448 ккал / 1876 кДж, что позволяет говорить о целесообразности его применения как пищевого ингредиента. Принимая во внимание полученные значения коэф-

фициента различия аминокислотного сора и коэффициента утилитарности, показывающего сбалансированность незаменимых аминокислот, можно утверждать, что полученный рыбный порошок характеризуется хорошим качественным составом белка с биологической ценностью не менее 61%. Соотношение незаменимых аминокислот к заменимым составило 1:1,6, что свидетельствует о легкости переваривания полученного белкового порошка. Таким образом данный продукт может являться дополнительным источником полноценного белка в составе комбинированных продуктов питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бодрякова, Н.П. Проблемы продовольственной безопасности Российской Федерации в условиях пандемии / Н.П. Бодрякова, М.Р. Мамедова // «Товароведение, технология, экспертиза: инновационные решения и перспективы развития: материалы || националь. науч.-практ. конф. – М.: ФГБОУ ВО МГАВМиБ – МВА имени К.И. Скрябина, 2021. – С. 210-216. ISBN: 978-5-863-41-474-4.
2. Бодрякова, Н.П. Экологические аспекты утилизации отходов рыбной промышленности / Н.П. Бодрякова, К.В. Есепенок, Н.А. Двинских // Актуальные вопросы зоологии, экологии и охраны природы: Материалы национальной научно-практической конференции, посвященной 90-летию организации кафедры зоологии, экологии и охраны природы имени А.Г. Банникова, Москва, 06 декабря 2021 года / Ответственные редакторы и составители: Остапенко В.А., Коновалов А.М. – Том Выпуск 4. – Москва: ЗооВетКнига, 2022. – С. 29-35.
3. Гнедов, А.А. Проблема накопления отходов рыбопереработки в населенных пунктах Енисейского Севера / А.А. Гнедов // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 10(49). – С. 194-198.
4. Горбачева, М.В. К вопросу об утилизации сырьевых ресурсов животного происхождения для получения биоактивных компонентов / М.В. Горбачева, Т.В. Сухинина, И.Р. Илиева // Пищевая инженерия, экспертиза и безопасность продукции АПК: инновационные решения и перспективы развития: Сборник научных трудов конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук, Москва, 06 июня 2024 года. – Москва: Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА им. К.И. Скрябина, 2024. – С. 202-208.
5. Горбачева, М.В. Рецилинг пищевых отходов животного происхождения: перспективы развития и внедрения / М.В. Горбачева, Д.В. Белевцова, Л.К. Земцова // Пищевая инженерия, экспертиза и безопасность продукции АПК: инновационные решения и перспективы развития: Сборник научных трудов IV национальной научно-практической конференции, Москва, 01 июня 2023 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина», 2023. – С. 28-34.
6. Двинских, Н.А. Актуальность переработки рыбных отходов / Н.А. Двинских, Н.П. Бодрякова, К.В. Есепенок // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Неделя студенческой науки», Москва, 25 апреля 2023 года / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина». – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина», 2023. – С. 649-651.
7. Двинских, Н.А. Разработка безотходной технологии переработки рыбных отходов / Н.А. Двинских, Н.П. Бодрякова, К.В. Есепенок // Чугуновские агропротечения: Сборник научных статей по материалам XV Всероссийской научно-практической конференции агропротехнологической направленности «Чугуновские агропротечения-2023», посвященной 85-летию академика, профессора, доктора сельскохозяйственных наук Чугунова Афанасия Васильевича и 35-летию агропрофилированных школ Республики Саха (Якутия), Якутск, 18-19 мая 2023 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2023. – С. 275-280.
8. Есепенок, К.В. Органолептическая оценка качества сухого белкового гидролизата / К.В. Есепенок, Н.П. Бодрякова, Н.А. Двинских // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии, биотехнологии и экспертизы сырья и продуктов животного происхождения: Сборник трудов 3-й Научно-практической конференции, Москва, 28 июня 2024 года. – Москва: ООО "Издательство "Сельскохозяйственные Технологии", 2024. – С. 466-467.
9. Каклюгин, Ю.В. Возможности высокотехнологичной переработки вторичных рыбных ресурсов / Ю.В. Каклюгин, Г.И. Касьянов // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2015. – № 6. – С. 487-497.
10. Костылева, Е.В. Использование протеолитических ферментов для получения белковых гидролизатов пищевого назначения из вторичного сырья / Е.В. Костылева, А.С. Середина, И.А. Великорецкая, Е.И. Курбатова, Н.В. Цурикова // Вопросы питания. – 2023. – Т. 92. – № 1. – С. 116-132. – DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-116-132>.
11. Максимова, Е.М. Разработка технологии утилизации белковых отходов методом ферментативного гидролиза / Е.М. Максимова // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2006. – Т. 9, № 5. – С. 875-879.
12. Оценка потенциала вторичного белокосодержащего сырья на предприятиях Калининградской области и России / О.Я. Мезенова, В.В. Волков, С.В. Агафонова, Н.Ю. Мезенова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 92-99.
13. Патент № 2410894 С1 Российская Федерация, МПК A23J 1/04. Способ получения белкового продукта из рыбного сырья: № 2009120893/13: заявл. 01.06.2009: опубл. 10.02.2011 / М.Е. Цибизова, Д.С. Язенкова, Н.Д. Аверьянова; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Астраханский государственный технический университет" (ФГОУ ВПО "АГТУ").
14. Патент № 2508681 С1 Российская Федерация, МПК A23J 1/04, A23L 1/325. пищевой белковый продукт: № 2012135856/10: заявл. 21.08.2012: опубл. 10.03.2014 / Р.И. Шаззо, В.В. Лисовой, Д.А. Меташоп, Э.И. Шумская; заявитель Государственное научное учреждение Краснодарский научно-исследовательский институт хранения и переработки сельскохозяйственной продукции Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ КНИИХП Россельхозакадемии).
15. Похольченко, В.А. Разработка и создание ресурсо- и энергоэффективной технологии сушки структурированных рыбных изделий / В.А. Похольченко, А.П. Смирнова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2020. – vol. 45. – № 3. – pp. 36-45. – DOI: <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2020-10-3-36-45>.
16. Селиванова, Ю.И. Безопасность продукции из рыбы, утилизация отходов рыбной промышленности / Ю.И. Селиванова // Инновации: перспективы, проблемы, достижения: Материалы Десятой Международной научно-практической конференции, Москва, 14 июня 2022 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова. – Москва: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 2023. – С. 39-45.
17. Соколов, А.В. Современное состояние и тенденции развития рыбохозяйственного комплекса России / А.В. Соколов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2019. – № 4. – С. 36-48.
18. Цибизова, М.Е. Маломерное рыбное сырье и отходы от разделки промысловых рыб - потенциальное сырье для получения функционально значимых компонентов пищи / М.Е. Цибизова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2010.

– № 2. – С. 130-137.

19. Шагаева, Н.Н. Возможность использования продуктов переработки рыбы в пищевых целях / Н.Н. Шагаева // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. – 2015. – № 1. – С. 533-534.

20. Шагаева, Н.Н. Рациональное использование продуктов переработки рыбы в пищевых целях / Н.Н. Шагаева // Аграрная наука: поиск, проблемы, решения : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РФ, доктора сельскохозяйственных наук, профессора В.М. Куликова, Волгоград, 08-10 декабря 2015 года / главный редактор А.С. Овчинников. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2015. – С. 326-330.

21. Югай, А.В. Актуальность использования рыбных белковых гидролизатов в технологии пищевых продуктов / А.В. Югай // Health, Food & Biotechnology. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 51-65. – DOI: <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i2.s173>.

22. Ahmed, M. Collagen extraction and recent biological activities of collagen peptides derived from sea-food waste: a review / M. Ahmed, A. K. Verma, R. Patel // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2020. – vol. 18. – 100315. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100315>.

23. Espinoza, D. Avances tecnológicos en la obtención, identificación y producción de hidrolizados proteicos de residuos de pescado por acción enzimática: propiedades bioactivas y tecnofuncionales, aplicación en alimentos, mercado y regulación / D. Espinoza, A. Castillo // Scientia Agropecuaria. – 2022. – vol. 13. – № 2. – pp. 135-148. – DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.012>.

24. Hemker, A.K. Effects of pressure-assisted enzymatic hydrolysis on functional and bioactive properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) by-product protein hydrolysates / A.K. Hemker, L.T. Nguyen, M. Karwe, D. Salvi // LWT - Food Science and Technology. – 2020. – vol. 122. – 109003. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.109003>.

25. Korkmaz, K. Optimization of hydrolysis conditions for the production of protein hydrolysates from fish wastes using response surface methodology / K. Korkmaz, B. Tokur // Food Bioscience. – 2021. – 101312. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101312>.

26. Kristinsson, H.G. Fish protein hydrolysates: production, biochemical, and functional properties / H.G. Kristinsson, B.A. Rasco // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2020. – vol. 40. – № 1. – pp. 43-81. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10408690091189266>.

27. Mangano, V. Protein hydrolysates from anchovy waste: purification and chemical characterization / V. Mangano, T. Gervasi, A. Rotondo, P. De Pasquale, G. Dugo, F. Macrì, A. Salvo // Foods and Raw materials. – 2021. – vol. 35. – № 3. – pp. 399-406. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2019.1634711>.

28. Volkov, V.V. Hydrolysis products from sockeye (*Oncorhynchus nerka* L.) heads from the Kamchatka Peninsula produced by different methods: biological value / V.V. Volkov, O.Ya. Mezenova, J.-T. Moersel, S. Kuehn, T. Grimm, A. Hoehling, S.A. Barabanov, K.S. Volkov // Foods and Raw materials. – 2021. – vol. 9. – № 1. – pp. 10-18. – DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-10-18>.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 635.262:543.64

EDN: JYMEOU

ВЛИЯНИЕ НЕМИКРОБНОЙ ФЕРМЕНТАЦИИ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА *ALLIUM SATIVUM L.*

©Автор(ы) 2025

ORCID: 0000-0001-8757-3984

БАНИЩИКОВА Елена Евгеньевна, аспирант кафедры биотехнологии и инжиниринга,

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: sfk_avrora@list.ru)

SPIN: 2551-2375

AuthorID: 482628

ORCID: 0000-0002-9146-6951

ResearcherID: B-4318-2017

ScopusID: 57218252488

ШКОЛЬНИКОВА Марина Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры Технологии питания

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru)

SPIN: 4621-3360

AuthorID: 571351

ORCID: 0000-0002-3982-9700

ResearcherID: W-6663-2018

ScopusID: 50462502800

РОЖНОВ Евгений Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры биотехнологии и инжиниринга

Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: e.d.rojnov@usue.ru)

ВОЛОЧКО Милана Владимировна, студентка программы специалитета «Лечебное дело»

Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова

Министерства здравоохранения Российской Федерации

(117513, Россия, г. Москва, ул. Островитянова, дом 1, строение 6)

Аннотация. Цель исследования – оценка влияния немикробной ферментации на свойства и химический состав чеснока. Задачи: систематизировать актуальные научные данные по влиянию немикробной ферментации на свойства и химический состав чеснока; проанализировать влияние соединений черного чеснока на его органолептические свойства; проанализировать роль ферментации на образование и содержание биологически активных соединений в черном чесноке. При выполнении работы использовали такие научные методы, как поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение. Поиск осуществляли в общедоступных ресурсах: наукометрических электронных базах данных *Elibrary*, *Ciberleninka*, *Академия Google*, издательстве *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. Глубина поиска с 1992 по 2024 гг. С целью устранения неприятного запаха и усиления пищевой ценности свежий чеснок подвергают тепловой обработке в контролируемых условиях: $T=50-80^{\circ}\text{C}$, влажность 70-80% в течение 14-90 сут., инициирующей немикробную ферментацию. Приведена характеристика органолептических свойств черного чеснока и показано влияние на цвет, консистенцию, аромат и вкус изменение химического состава: в процессе ферментации основной компонент чеснока аллиин преобразуется в серосодержащие – *S*-аллилмеркаптоцистеин и *S*-аллилцистеин, образуются меланоидины, содержание витамина C, фенольных соединений и флавоноидов увеличивается в разы, что влечет повышение антиоксидантной активности черного чеснока.

Ключевые слова: чеснок, виды обработки, тепловая обработка, немикробная ферментация, свойства, химический состав.

INFLUENCE OF NON-MICROBIAL FERMENTATION ON THE CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF *ALLIUM SATIVUM L.*

© The Author(s) 2025

BANSCHIKOVA Elena Evgenievna, postgraduate student of the department of Food Engineering

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45, e-mail: sfk_avrora@list.ru)

SHKOLNIKOVA Marina Nikolaevna, doctor of technical sciences, associate professor,

professor of the Nutrition Technology Department

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45, e-mail: shkolnikova.m.n@mail.ru)

ROZHNOV Evgeniy Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor of the Department of Food Engineering

Ural State Economic University

(620144, Russia, Ekaterinburg, 8 March/Narodnaya Volya st., 62/45, e-mail: e.d.rojnov@usue.ru)

VOLOCHKO Milana Vladimirovna, student of the specialty program "Medicine"

Pirogov Russian National Research Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation.

(117513, Russia, Moscow, Ostrovityanova St., 1, building 6)

Abstract. The aim of the study was to assess the effect of non-microbial fermentation on the properties and chemical composition of garlic. Objectives: to systematize current scientific data on the effect of non-microbial fermentation on the properties and chemical composition of garlic; to analyze the effect of black garlic compounds on its organoleptic properties; to analyze the role of fermentation on the formation and content of biologically active compounds in black garlic. In carrying out the work, the following scientific methods were used: searching and screening of scientific literature, data extraction, analysis, systematization and generalization. The search was carried out in publicly available resources: scientometric electronic databases *Elibrary*, *Ciberleninka*, *Google Academy*, publishing house *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. Search depth from 1992 to 2024. In order to eliminate unpleasant odor and enhance nutritional value, fresh garlic is heat treated under controlled conditions: $T=50-80^{\circ}\text{C}$, humidity 70-80% for 14-90 days, initiating non-microbial fermentation. The organoleptic properties of black garlic are characterized and the effect of changes in chemical composition on color, consistency, aroma and taste is shown: during fermentation, the main component of garlic, alliin, is converted into sulfur-containing *S*-allylmercaptocysteine and *S*-allylcysteine, melanoidins are formed, the content of vitamin C, phenolic compounds and flavonoids increases several times, which leads to an increase in the antioxidant activity of black garlic.

Key words: garlic, types of processing, heat treatment, non-microbial fermentation, properties, chemical composition.

Для цитирования: Баницкова Е.Е. Влияние немикробной ферментации на химический состав и свойства *Allium Sativum* L. / Е.Е. Баницкова, М.Н. Школьников, Е.Д. Рожнов, М.В. Волочко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 86-91. – EDN: JYMEOY.

Введение. На протяжении столетий люди традиционно использовали чеснок (*Allium sativum* L.) в качестве пищевого ингредиента/пряности и средства от многих болезней. Как показало исследование [1], чеснок отнесен к категории «суперпродукты», оказывающие положительное влияние на здоровье человека и полезные для профилактики заболеваний, особая категория продуктов питания с разнообразным и высоким содержанием нутриентов. Свежий чеснок содержит макро- и микроэлементы (цинк, фосфор, калий, кальций, железо, селен, магний, марганец, йод), в том числе редкие – никель, кобальт и хром, биологически активные вещества – витамины A, C, PP и группы B, полифенольные соединения с сильными антиоксидантными свойствами (флавоноиды, флаванолы, фенольные кислоты и танины [2], сапонины) и полисахариды). Отличает чеснок содержание смеси сероорганических соединений (в том числе аллиин (сульфоксид *s*-аллил-*L*-цистеина), глутамил-*s*-аллил-цистеин и их производные), определяющие как его исключительные кулинарные свойства, так и многогранное биологическое и терапевтическое действие чеснока – антибактериальное, противогрибковое и противовирусное [3]. В частности показано, что образующийся при разрушении аллиина аллицин снижает тяжесть и продолжительность респираторных инфекций как у взрослых, так и у детей [4]. Также чеснок может способствовать нормальной деятельности сердечно-сосудистой системы за счет улучшения липидного профиля (снижение уровня триглицеридов и холестерина, повышение значений ЛПВП), артериального давления и эндотелиальной функции, а регулярное употребление сырого чеснока может снизить риск предгипертонии. К добавленной полезно-

сти чеснока следует отнести антиоксидантную активность фенольных и сероорганических соединений, а также пребиотический эффект экстрактов чеснока на микробиоту кишечника [5-8].

Нельзя не отметить, что при любом механическом воздействии – резке, дроблении, измельчении, кусании, различной технологической обработке (включая термическую) под воздействием выделяющегося вакуолярного фермента (аллииназы) образуются различные производные серных соединений аллиина, гидролизуемого до аллицина, в том числе – сульфиды, дисульфиды, диаллилтрисульфиды, *S*-аллилцистеин и аджоены, которые и придают свежему чесноку его типичный острый вкус и аромат, которые делают его довольно спорной пряностью [9]. Аллицин (диаллилтиосульфид) является наиболее распространенным и наиболее изученным ферментативным продуктом аллиина, *S*(+)-аллил-*L*-цистеин сульфоксида и аллииназы, быстро образующийся в результате разрыва клеток сырых зубчиков чеснока или когда высушенные и измельченные зубчики (чесночный порошок) подвергаются увлажнению [10]. Аллицин является летучим термолабильным веществом [11].

Несмотря на широкий спектр его полезных для здоровья свойств, потребление свежего чеснока, за исключением Китая и Индии, снижается [12], так как употребление свежего чеснока и полученных из него продуктов приводит к специфическому и очень устойчивому запаху изо рта – в полости рта из сероводородных соединений чеснока образуется метилмеркаптан и обуславливающий неприятный запах. Кроме того, в результате пищеварения в желудка образуются такие сероорганические соединения как

аллилмеркаптан и аллилметилсульфид, которые выделяются с выдыхаемым воздухом и выводятся через потовые и сальные железы кровотоком, что приводит к неприятному запаху тела [13]. Поэтому многие люди часто не решаются употреблять в пищу чесночные продукты.

В связи с этим, ведутся исследования по нивелированию специфического запаха чеснока, в частности – показана дезодорирующая активность экстрактов тимьяна (*Thymus vulgaris* L.) и розмарина (*Rosmarinus officinalis* L.), хлорогеновой и кофейной кислот, чайного катехина и семян черного тмина (*Nigella sativa* L.) [14].

На сегодня продолжается поиск новых методов его обработки, с одной стороны, чтобы устранить неприятный запах и улучшить органолептические характеристики, с другой – усилить пищевую ценность, технологические и функциональные (добавленная полезность) свойства. Одним из методов является тепловая обработка, инициирующая ферментацию без участия экзогенных микроорганизмов.

Методология. Цель настоящего исследования – оценка влияния немикробной ферментации на свойства и химический состав чеснока.

Задачи:

1. Систематизировать актуальные научные данные по влиянию немикробной ферментации на свойства и химический состав чеснока.
2. Проанализировать влияние соединений черного чеснока на его органолептические свойства.
3. Проанализировать роль ферментации на образование и содержание биологически активных соединений в черном чесноке.

Данное исследование проводилось в формате систематического обзора. Объектом послужили публикации российских и зарубежных авторов, посвященные исследованию свойств и химического состава свежих луковиц чеснока посевного и подвергнутых тепловой обработке / немикробной ферментации. В рамках исследования проведен поиск научных статей за период 1992-2024 гг. по ключевым словам и их ком-

бинации: чеснок, виды обработки, тепловая обработка, немикробная ферментация, свойства, химический состав. Поиск осуществляли в общедоступных ресурсах: электронных базах данных *Elibrary*, *Ciberleninka*, *Академия Google*, издательстве *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. При выполнении работы использовали такие научные методы, как поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение.

Результаты. В процессе анализа научных статей, соответствующих критериям поиска, установлены такие виды обработки свежего чеснока для повышения его пищевой ценности: маринование и тепловая обработка. Наряду с черным чесноком, получают так называемый зеленый чеснок: луковицы свежего чеснока выдерживаются в течение 30 мин при комнатной температуре, затем замачиваются в 5-ти % уксусной кислоте при $T=50^{\circ}\text{C}$ на один час, далее выдерживаются в течение 30 мин при $T=80^{\circ}\text{C}$, также зеленый чеснок можно получить замачиванием в 5-ти % уксусной кислоте в соотношении 1:3 в течение двух недель при $T=4^{\circ}\text{C}$. Показано, что в результате маринования во вкусе зеленого чеснока нивелируется острота и специфичность вкуса свежих луковиц, увеличилось содержание сахаров, общего белка и полифенольных веществ, установлена более высокая по сравнению со свежим чесноком антиоксидантная активность, которая, однако ниже, чем у черного чеснока [15].

Тепловая обработка заключается в выдерживании вызревших луковиц свежего чеснока в контролируемых условиях: $T=50-80^{\circ}\text{C}$, влажность 70-80%, инициирующих немикробную ферментацию, в течение 14-90 сут. [9]. Известно, что тепловая обработка свежих луковиц при более высоких значениях температуры для сокращения времени обработки, приводит к значительному ухудшению вкуса и аромата, а также к накоплению вредных веществ, например, 5-гидроксиметилфурфурол [16].

Известно, что немикробная ферментация изменяет как органолептические характеристики чеснока (рис. 1), так и его химический состав (табл. 1).



Рисунок 1 – Внешний вид свежего и ферментированного чеснока

Таблица 1 – Состав и физические свойства свежего и ферментированного чеснока по [4, 17, 18]

Вещество / Показатель	Свежий	Черный*
Сухие вещества, %	40,76±0,20	От 48,69±0,43 До 84,86±0,39
Аскорбиновая кислота, mg 100 g ⁻¹	8,03±1,27	От 11,72±1,27 до 45,98±0,25
Титруемая кислотность, %	0,12 ±0,03	От 2,06±0,15 до 2,53±0,10
Сырой протеин, % СВ	3,80±0,03	От 5,15±0,10 до 12,10±0,01
Пищевые волокна, % СВ	0,81±0,01	От 3,75±0,21 до 5,66±0,43
Сырая зола, % СВ	0,67±0,05	От 0,81±0,05 до 2,60±0,04
pH, ед. pH	6,0–6,5	4,17–4,41
Сахара, г/100 г	4,50	19,9–31,6
Фруктан, mg/g	580	493–551
Фенольные соединения, mg GAE 100 g ⁻¹)	59,73±1,10	От 394,19±6,64 до 571,75±66,67
Флавоноиды, mg RE/g rutin equivalents		322
АОА, %	6,01±1,33	От 32,03±1,16 до 59,22±0,37
S-аллилцистеин, мг/100 г	25,00	От 29,80 до 50,50
Аллиин, мг/100 г	1150,00	75,00–80,00
Твердость	27,29 Н	1,26–3,12 Н
Липкость	–0,03 Н	От –0,08 до –0,25 Н**

*различные условия ферментации: Т, °С: 50, 60 и 80, влажность, %: 70, 80,85, продолжительность, сут.: 14, 28 и 99.

** Самый высокий уровень липкости у ЧЧ, ферментированного при влажности 80 % и более высокой температуре 80 °С в течение 14 сут.

Обсуждение. Как видно из рисунка 1 и таблицы 2, ферментированный чеснок отличается темным цветом и эластичной и податливой желеобразной/мягкой/кремообразной текстурой/консистенцией, в отличие от типичной хрустящей текстуры свежего чеснока. От текстуры пищевого продукта зависит такое свойство как липкость, которая ощущается на небе, зубах и языке при его жевании, а также может быть определена инструментально – как видно из таблицы

1, липкость ферментированного чеснока превышает аналогичный показатель свежих зубцов в 2,6–8,3 раза. В то время как твердость ферментированного чеснока снижается в 8,3–21,6 раза.

Данный факт объясняется тем, что в условиях высокой температуры разрушаются полисахариды клеточной стенки, что, в свою очередь, приводит к размягчению тканей и жевательной, желеобразной текстуре [19, 20].

Таблица 2 – Органолептические свойства черного чеснока

Свойство	Характеристика
Цвет	От темно-коричневого до черного
Консистенция	Желеобразная, мягкая, кремообразная
Аромат	Специфический сложный с тонами вареного чеснока, карамели, свежего чеснока, свежего огурца и вареного картофеля
Вкус	Сладкий, специфический

Изменение цвета луковиц – от коричневого до черного, происходит в результате серии неферментативных реакций потемнения между восстанавливающими сахарами и аминокислотами с образованием темноокрашенных соединений – меланоидинов, которым отводят ключевую роль в изменении цвета и влиянии на биологическую активность черного чеснока, включая антиоксидантную, антибактериальную, противовоспалительную, гипогликемическую и гипотензивную активность [21]. Также, в работе [22] показано, что меланоидины вносят свой вклад в формирование мягкой текстуры и сладкого фруктового вкуса черного чеснока.

Известно, что специфический резкий запах свежего чеснока в процессе тепловой обработки утрачивается, так как обуславливающий его аллиин преобразуется в серосодержащие соединения (его содержание снижается с 1150 мг/100 г до 75–80 мг/100 г), включая S-аллилмеркаптоцистеин и S-аллилцистеин, содержание последнего увеличивается порой в 2 раза – с 25 мг/100 г до 50 мг/100 г (табл. 1).

В аромате черного чеснока идентифицировано более 50 ароматических соединений с выделением 9 ключевых ароматически активных, из которых признаны очень значимыми: аллилметилтрисульфид (вареный чеснок), фуранеол (карамель), диаллилдиисульфид (свежий чеснок), (E,Z)-2,6-нонадиен-1-ол (огурец, свежий), 3-(метилтио)-пропиоальдегид (вкус вареного картофеля) [23].

Содержание сахаров в черном чесноке увеличивается в 4–7 раз (табл. 1) и обуславливает его сладкий вкус за счет глюкозы, фруктозы, сахарозы, мальтозы, арабинозы и галактозы, образующимися при частичном распаде фруктанов, содержание которых снижается на 5–15% [24].

Также по мнению авторов [25], во вкусе черного чеснока ощутимы тона сушеной сливы, соевого соуса, бальзамического уксуса, аниса и эспрессо, а меньшей степени – карамели, солодки и тамаринда, авторы [26] характеризуют вкус черного чеснока как кисло-сладкий с нотками чернослива, абрикоса и ванили.

Надо сказать, что в последние годы черный чеснок традиционно пользуется большим спросом

у потребителей Японии, Сингапура, Кореи и Китая. Вместе с тем в современном мире кулинария постоянно эволюционирует, и новые кулинарные направления могут возникать из различных культурных смещений и вдохновений. В этой связи стоит отметить набирающее популярность гастрономическое направление паназия в России, в рамки которого хорошо вписывается применение черного чеснока как готового к употреблению продукта питания, так и ингредиента пищевых продуктов.

В ходе анализа источников установлено, что ферментация влияет на основной состав и физико-химические свойства чеснока, но и увеличивает концентрацию биологически активных веществ – независимо от условий ферментации химический состав луковиц черного чеснока существенно отличается в лучшую сторону от состава луковиц белого/свежего чеснока. Так, значительно увеличивается содержание витамина С (в 1,5-5,8 раза), титруемая кислотность (в 14,7-21,0 раза), содержание белка (в 1,4-3,2 раза), клетчатки (в 4,6-7,0 раза) и золы (в 1,2-3,9 раза). Содержание фенольных соединений увеличивается в 6,6-9,6 раза, что влечет за собой и увеличение антиоксидантной активности в 5,3-9,9 раза. В тоже время, Lu X. и соавторы предположили, что антиоксидантная активность черного чеснока является синергетическим эффектом некоторых стабильных компонентов – фенольных соединений, флавоноидов, органических кислот, а также соединений образовавшихся в процессе ферментации, например, S-аллилцистеин и меланоидины [27]. При этом, доказано что антиоксидантная способность черного чеснока положительно коррелировала со степенью потемнения луковиц, т.е. содержанием меланоидинов [28].

Также процесс ферментации приводит к снижению рН чеснока с 6,0-6,5 до 4,17-4,41, а также снижению содержания влаги, увеличивая его срок годности.

Выводы. Установлено, что немикробная ферментация существенно меняет как органолептические свойства чеснока – цвет, консистенция, аромат и вкус, так и его химический состав. Показано, что черный чеснок демонстрирует ряд преимуществ по сравнению со свежим чесноком и отчасти может являться альтернативой последнему.

Ферментированный чеснок отличается темным цветом – от темно-коричневого до черного, эластичной и податливой желеобразной консистенцией, аромат – специфический сложный с тонами вареного чеснока, карамели, свежего чеснока, свежего огурца и вареного картофеля без резкого запаха свежего чеснока вкус сладкий, со специфическими тонами.

В процессе ферментации основной компонент чеснока аллиин преобразуется в серосодержащие – S-аллилмеркаптоцистеин и S-аллилцистеин, образуются меланоидины, содержание витамина С, фенольных соединений и флавоноидов увеличивается в разы, что в синергии влечет повышение антиоксидантной активности черного чеснока.

Таким образом, наряду с систематизацией имеющихся знаний, крайне важно изучение процесса взаимодействия компонентов черного чеснока с макро- и микронутриентами пищевых систем с одной стороны, а с другой – исследование механизма усвоения ключевых биологически активных веществ черного чеснока из пищевой матрицы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Cobos A., Diaz O. Superfoods: Reliability of the Information for Consumers Available on the Web // *Foods*. – 2023. – № 12(3). – Article: 546. <https://doi.org/10.3390/foods12030546>.
2. Kim J., Kang O.J., Gweon, O.C. Comparison of phenolic acids and flavonoids in black garlic at different thermal processing steps // *Journal of Functional Foods*. – 2013. – № 5. – P. 80-86.
3. Najman K., Sadowska A., Hallmann E. Evaluation of Bioactive and Physicochemical Properties of White and Black Garlic (*Allium sativum* L.) from Conventional and Organic Cultivation // *Applied Sciences*. – 2021. – № 11. – Article: 874. <https://doi.org/10.3390/app11020874>.
4. Melguizo-Rodríguez L. et al. Biological properties and therapeutic applications of garlic and its components // *Food & Function*. – 2022. – № 13(5). – P. 2415-2426.
5. Purev U., Chung M.J., Oh D.H. Individual differences on immunostimulatory activity of raw and black garlic extract in human primary immune cells // *Immunopharmacol Immunotoxicol*. – 2012. – № 34. – P.651-660. doi: 10.3109/08923973.2011.649288.
6. Yudhistira B. et al. S-Allyl cysteine in garlic (*Allium sativum*): Formation, biofunction, and resistance to food processing for value-added product development // *Comprehensive reviews in food science and food safety*. – 2022. – № 21(3). – P. 2665-2687.
7. Ribeiro M. et al. From the distinctive smell to therapeutic effects: Garlic for cardiovascular, hepatic, gut, diabetes and chronic kidney disease // *The American Journal of Clinical Nutrition*. – 2021. – № 40. – P. 4807-4819.
8. Елисева Т., Ямпольский А. Чеснок (лат. *Állium sativum*) // *Журнал здорового питания и диетологии*. – 2019. – № 7. – С. 11-22. <https://doi.org/10.59316/vi7>.
9. Kimura S. et al. Black garlic: A critical review of its production, bioactivity, and application // *Journal of Food and Drug Analysis*. – 2017. – № 25. – P. 62-70.
10. Lawson L.D., Hughes B.G. Characterization of the formation of allicin and other thiosulfonates from garlic. *Planta Medica*. – 1992. – № 58. – P. 345-350.
11. Хлыбов Н.А., Бараненко Д.А. Экстракция фитонцидов чеснока для увеличения микробиологической стабильности мясopодуKтов при холодильном хранении // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. – 2014. – № 4. – С. 222-229.
12. Ryu J.H., Kang D. Physicochemical properties, biological activity, health benefits, and general limitations of aged black garlic: A review // *Molecules*. – 2017. – № 22. – Article: 919.
13. Rosen R.T. et al. Determination of allicin, S-allylcysteine and volatile metabolites of garlic in breath, plasma or simulated gastric fluids // *The Journal of Nutrition*. – 2001. – № 131. – P. 968S-971S.
14. Yoshioka Y., Matsumura S., Morimoto M. Deodorant Activity of Black Cumin Seed Essential Oil against Garlic Organosulfur Compound // *Biomolecules*. – 2021. – № 11. – Article: 1874. <https://doi.org/10.3390/biom11121874>.
15. Lu J. et al. Biochemical Composition, Antioxidant Activity and Antiproliferative Effects of Different Processed Garlic Products // *Molecules*. – 2023. – № 28. – Article: 804. <https://doi.org/10.3390/molecules28020804>.
16. Jeong Y.S. et al. Effects of the Aging Conditions on the Quality Characteristics of Garlic // *The Korean Journal of Food And Nutrition*. – 2015. – V.28. №5. – P.745-751. doi : <https://doi.org/10.9799/ksfan.2015.28.5.745>.
17. Paulauskienė A., Kulbokas Š., Zvicevičius E., Tarasevičienė Ž. Changes in Garlic Quality during Fermentation under Different Conditions // *Foods*. – 2024. – № 13. – Article: 1665. <https://doi.org/10.3390/foods13111665>.
18. Shin J.-H., Kang M.-J., Lee B.H., Kang D. Effect of Temperature Conditions on the Physicochemical Quality of Aged Black Garlic // *Foods*. – 2024. – № 13. – Article: 3974. <https://doi.org/>

10.3390/foods13233974.

19. Martínez-Casas L., Lage-Yusty M., López-Hernández J. Changes in the aromatic profile, sugars, and bioactive compounds when purple garlic is transformed into black garlic // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2017. – № 65. – P.10804-10811. doi: 10.1021/acs.jafc.7b04423.

20. Yang P., Song H., Wang L., Jing H. Characterization of key aroma-active compounds in black garlic by sensory-directed flavor analysis // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2019. – № 67. – P. 7926-7934. doi: 10.1021/acs.jafc.9b03269.

21. Wu J., Jin Y., Zhang M. Evaluation on the physicochemical and digestive properties of melanoidin from black garlic and their antioxidant activities in vitro // *Food Chemistry*. – 2020. – № 340. – Article:127934. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127934.

22. Zhao Y., Ding Y., Wang D., Deng Y., Zhao Y. Effect of high hydrostatic pressure conditions on the composition, morphology, rheology, thermal behavior, color, and stability of black garlic melanoidins // *Food Chemistry*. – 2021. – № 337. – Article: 127790. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127790.

23. Yang P., Song H., Wang L., Jing H. Characterization of key aroma-active compounds in black garlic by sensory-directed flavor analysis // *Journal of agricultural and food chemistry*. – 2019. – № 67(28). – P. 7926-7934. doi: 10.1021/acs.jafc.9b03269.

24. Schwab W. Natural 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone (Furaneol®) // *Molecules*. – 2013. – № 18. – P. 6936-6951.

25. Augustýnská-Prejsnar A. et al. Quality Assessment of Minced Poultry Products Including Black Fermented Garlic // *Foods*. – 2024. – № 13. – 70. <https://doi.org/10.3390/foods13010070>.

26. Qiu Z. et al. Formation, nutritional value, and enhancement of characteristic components in black garlic: A review for maximizing the goodness to humans // *Comprehensive reviews in food science and food safety*. – 2020. – № 19. – P. 801-834.

27. Lu X. et al. Composition analysis and antioxidant properties of black garlic extract // *Journal of Food and Drug Analysis*. – 2017. – № 25(2). – P. 340-349.

28. Wang B. et al. Formation, Evolution, and Antioxidant Activity of Melanoidins in Black Garlic under Different Storage Conditions. *Foods*. – 2023. – № 12. – Article: 3727. <https://doi.org/10.3390/foods12203727>.

Статья поступила в редакцию 23.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 634.725:637.148

END: LKJRYJ

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТА ИЗ СЛИВОК ПОВЫШЕННОЙ ЖИРНОСТИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7857-0301

AuthorID: 299690

ORCID: 0000-0002-5870-2350

ResearcherID: ABF-9586-2020

ScopusID: 6507308304

ГОЛУБ Ольга Валентиновна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук

(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: golubov@sfscs.ru)

SPIN: 4707-3430

AuthorID: 1127163

ORCID: 0000-0002-2249-7666

МОТОВИЛОВА Наталья Владимировна, аспирант, младший научный сотрудник

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук

(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: motovilovanv@sfscs.ru)

SPIN: 1739-3120

AuthorID: 369296

ORCID: 0000-0002-0439-9413

ЛОБАЧЕВА Елена Михайловна, кандидат технических наук,

доцент кафедры технологии продуктов питания животного происхождения

Кемеровский государственный университет

(650000, Кемерово, ул. Красная, 6, e-mail: lobacheva06@rambler.ru)

SPIN-код: 1217-7717,

AuthorID: 388694

ORCID ID: 0000-0003-2298-3549

ResearcherID: B-4298-2017

ScopusID: 57190976959

МОТОВИЛОВ Олег Константинович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук

(630501, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, e-mail: motovilovok@sfscs.ru)

SPIN-код: 7513-1585

AuthorID: 307536

ORCID ID: 0000-0003-2479-8750

ResearcherID: E-9331-2014

ScopusID: 57190976010

ДАВЫДЕНКО Наталия Ивановна, доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой технологии и организации общественного питания

Кемеровский государственный университет

(650000, Кемерово, ул. Красная, 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)

Аннотация. Цель работы – исследовать влияние количества добавляемых ягод крыжовника, температуры и продолжительности обработки роторным аппаратом на органолептические характеристики продукта из сливок повышенной жирности. Объект исследований – продукт из сливок повышенной жирности с добавлением ягод крыжовника, полученный с использованием роторного аппарата. В качестве плана эксперимента выбран трехуровневый полный факторный эксперимент: независимые переменные – количество ягод, температура и продолжительность обработки роторным аппаратом; зависимые переменные – внешний вид и консистенция (не менее 0,66 баллов), цвет (не менее 0,20 баллов), запах и вкус (не менее 1,32 баллов) продукта. Установили, что на формирование внешнего вида и консистенции, цвета, запаха и вкуса продукта из сливок повышенной жирности наибольшее влияние оказывала продолжительность обработки роторным аппаратом (сила влияния более 89,5 %, $p < 0,01$). Получены математическая зависимость и графическая интерпретация зависимости оценок за органолептические показатели от исследуемых факторов. Определено, что для изготовления продукции с наилучшими органолептическими характеристиками следует использовать от 10 до 14 % ягод, температуру 74-77 °С и продолжительность обработки в роторном аппарате 19-35 мин, при скорости вращения диспергатора 2900 об/мин, мешалки 10 об/мин.

Ключевые слова: оптимизация, полный факторный эксперимент, сливки, *Ribes uva-crispa L.*, роторный аппарат, органолептические характеристики.

OPTIMIZATION OF CONDITIONS FOR OBTAINING A PRODUCT FROM HIGH-FAT CREAM

© The Author(s) 2025

GOLUB Olga Valentinovna, doctor of technical sciences, professor, chief researcher*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: golubov@sfscs.ru)***MOTOVILOVA Natalya Vladimirovna**, junior researcher*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: motovilovanv@sfscs.ru)***LOBACHEVA Elena Mikhailovna**, candidate of technical sciences,

docent of the department of technology of animal origin food products

*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: lobacheva06@rambler.ru)***MOTOVILOV Oleg Konstantinovich**, doctor of technical sciences, docent, chief researcher*Siberian Federal scientific center of agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences
(630501, Russia, Novosibirsk region, Novosibirsk region working village Krasnoobsk, e-mail: motovilov@sfscs.ru)***DAVYDENKO Nataliia Ivanovna**, doctor of technical sciences, docent,

head of technology and organization of public catering department

*Kemerovo State University**(650000, Russia, Kemerovo, Krasnaya st., 6, e-mail: nat1861@yandex.ru)*

Abstract. The aim of the work is to investigate the effect of the amount of gooseberry berries added, temperature and duration of processing by a rotary apparatus on the organoleptic characteristics of a product made from high-fat cream. The object of research is a product made from high-fat cream with the addition of gooseberry berries, obtained using a rotary apparatus. A three-level complete factorial experiment was chosen as the experimental plan: independent variables – the number of berries, temperature and duration of treatment with a rotary apparatus; The dependent variables are the appearance and consistency (at least 0.66 points), color (at least 0.20 points), smell and taste (at least 1.32 points) of the product. It was found that the formation of the appearance and consistency, color, smell and taste of a product made from high-fat cream was most influenced by the duration of treatment with a rotary apparatus (the effect was more than 89.5%, $p < 0.01$). The mathematical dependence and graphical interpretation of the dependence of organoleptic scores on the studied factors are obtained. It was determined that for the manufacture of products with the best organoleptic characteristics, 10 to 14% of berries should be used, a temperature of 74–77°C and a processing time in a rotary apparatus of 19–35 minutes, at a rotational speed of 2900 rpm dispersant, 10 rpm agitators.

Keywords: optimization, complete factorial experiment, cream, *Ribes uva-crispa* L., rotary apparatus, organoleptic characteristics.

Для цитирования: Голуб О.В. Оптимизация условий получения продукта из сливок повышенной жирности / О.В. Голуб, Н.В. Мотовилова, Е.М. Лобачева, О.К. Мотовилов, Н.И. Давыденко // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 92–99. – EDN: LKJRYJ.

Введение. Сливки, согласно ТР ТС 033/2013 «Технический регламент Таможенного союза. О безопасности молока и молочной продукции» (Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 09.10.2013г. № 67), представляют собою «...эмульсию молочного жира и молочной плазмы...» с массовой долей жира не менее 10%. Сливки нашли свое применение как непосредственно в питании человека, так и при изготовлении различных продуктов питания (кофейные, взбитые, кисломолочные, кремовые и пр.), в том числе функциональной направленности, поскольку содержат в своем составе физиологически активные нутриенты [1, 2]. Молочный жир, содержащийся в сливках, за счет своего количества, физического состояния и пр., оказывает положительное влияние не только на организм человека, но и обуславливает оригинальные органолептические характеристики продукции [3–5]. Например, из высокожирных пастеризованных

сливков, выработанных путем сепарирования цельного коровьего молока, изготавливается «Каймак» (КМС 213:2019 «Каймак. Технические условия», О'zDSt 352:2006 «Каймак. Технические условия»), сливки являются основой казахского молочного продукта «Бал-каймак» (СТ РК 1105-2015 «Национальные казахские молочные продукты. Бал-каймак. Технические условия»), Данильчук Т.Н. с соавторами предложено использовать сливки с массовой долей жира 20 % при изготовлении молочно-растительного супа-пюре и сметанного продукта, обладающих высокой антиоксидантной активностью и гепатопротекторными свойствами [6], Коноваловым С.А. с соавторами использовали сливки с массовой долей жира 10% для молочного десерта, содержащего физиологически активные вещества [7].

Формирование своеобразных органолептических и физических характеристик молочной продукции обусловлено множеством факторов (компонент-

ностью состава, технологией изготовления, используемой упаковкой и пр.) [8, 9]. Специалисты проводят исследования по разработке новых технологий получения продукции с целью получения новых видов, вкусов, минимизации потерь нативных веществ сырья, увеличению сроков хранения и пр. Наиболее распространенными новыми технологиями в молочной промышленности являются обработка высоким давлением [10], ультразвуком [11], холодной плазмой [12], импульсными электрическими полями [13] и пр. Ягоды крыжовника представляют собою не только источник биологически активных соединений [14], но и ингредиент, обуславливающий формирование качественных характеристик продукции, отвечающих запросам потребителей – например, компота [15], мармелада [16], пресервов [17], вин [18] и пр. При этом отмечено ограниченное количество исследований, посвященных разработке молочной продукции с использованием ягод крыжовника [19, 20].

На основании вышесказанного, цель работы – исследовать влияние количества добавляемых ягод крыжовника, температуры и продолжительности обработки роторным аппаратом на органолептические характеристики продукта из сливок повышенной жирности.

Методология. Объект исследований – продукт из сливок повышенной жирности, с добавлением ягод крыжовника (собранны на биополигоне СФНЦА РАН), полученный с использованием роторного аппарата (МАГ-50, ООО «Сибирская катализаторная компания», Россия). При изготовлении продукции использовали сливки с массовой долей жира 48%, казеинат натрия с массовой долей сухих веществ 94%, ягоды крыжовника с массовой долей сухих веществ 15%. Оценка органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности осуществлялась согласно разработанной 5-ти балльной системы с учетом коэффициентов весомости – внешний вид и консистенция $k = 0,3$, цвет $k = 0,1$, запах и вкус $k = 0,6$. Оптимизация органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности проводилась по стандартному трехфакторному плану – внешнего вида и консистенции не менее 0,66 баллов, цвета не менее 0,20 баллов, запаха и вкуса не менее 1,32 баллов. Уровни варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Фактор	Уровень варьирования факторов		
	верхний	нулевой	нижний
	+1	0	-1
Количество ягод крыжовника, % (x_1)	14	12	10
Температура обработки смеси, °C (x_2)	77	73	69
Продолжительность обработки смеси, мин (x_3)	35	25	15

Статистический анализ выполнен с использованием системы *Statistica* версии 10.0 компании *StatSoft*, все испытания выполнены в пяти повторениях, результаты выражены как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение. Силу влияния факторов на формирование органолептических характеристик продукции определяли, используя метод Снедекора.

Результаты. В таблице 2 представлены результаты исследования по влиянию количества добавляемых ягод крыжовника и параметров обработки смеси в МАГ-50 на оценки органолептических показателей продукта из сливок повышенной жирности, в таблице 3 – коэффициенты корреляции, в таблице 4 – значимости коэффициентов регрессии, адекватности уравнений регрессии.

Получены уравнения множественной регрессии, описывающие зависимость от исследуемых факторов органолептических показателей продукта из сливок повышенной жирности:

– внешнего вида и консистенции:

$$y_1 = -36,434 + 0,264x_1 + 0,787x_2 - 0,005x_2^2 + 0,549x_3 - 0,006x_3^2 - 0,002x_2x_3 - 0,003x_3^2 \quad (1)$$

– цвета:

$$y_2 = -11,474 + 0,242x_2 - 0,002x_2^2 + 0,213x_3 - 0,003x_3^2 - 0,001x_2x_3 - 0,001x_3^2 \quad (2)$$

– запаха и вкуса:

$$y_3 = -74,483 + 1,003x_1 - 0,015x_1^2 + 1,483x_2 - 0,008x_2^2 + 1,307x_3 - 0,014x_3^2 - 0,007x_1x_2 - 0,005x_2x_3 - 0,007x_3^2 \quad (3)$$

На рисунках 1-4 представлена графическая интерпретация результатов исследований, свидетельствующих о влиянии исследуемых факторов на органолептические характеристики продукции.

Обсуждение. Анализируя данные таблицы 2 установили, что на формирование внешнего вида и консистенции продукта из сливок повышенной жирности наибольшее влияние оказывал фактор «продолжительность обработки» (сила влияния 89,5%, $p < 0,01$), меньшее – фактор «температура обработки» и взаимодействие «продолжительность обработки $\times$ температура обработки» (сила влияния соответственно 6,2 и 3,2%, $p < 0,01$), незначительное – «количество ягод крыжовника», взаимодействия факторов «количество ягод крыжовника $\times$ температура обработки», «количество ягод крыжовника $\times$ продолжительность обработки» и «количество ягод крыжовника $\times$ продолжительность обработки $\times$ температура обработки» (сила влияния соответственно 0,2, 0,2, 0,5 и 0,1%, $p < 0,01$).

На формирование цвета продукта из сливок повышенной жирности наибольшее влияние оказывал фактор «продолжительность обработки» (сила влияния 91,8%, $p < 0,01$), меньшее – «температура обработки» и взаимодействие «продолжительность обработки $\times$ температура обработки» (сила влияния соответственно 4,4 и 2,6%, $p < 0,01$), незначительное – «количество ягод крыжовника», взаимодействия факторов «количество ягод крыжовника $\times$ продолжительность обработки» и «количество ягод крыжовника $\times$ продолжительность обработки $\times$ температура

обработки» (сила влияния соответственно 0,3, 0,7 и 0,1%, $p < 0,01$). Взаимосвязь «количество ягод крыжовника × температуры обработки» оказывала случайное воздействие на формирование цвета продукции ($p > 0,05$).

На формирование запаха и вкуса продукта из сливок повышенной жирности выявлено значимое влияние фактора «продолжительность обработки» (сила влияния 93,3%, $p < 0,01$), незначительное ос-

тальных факторов («количество ягод крыжовника», «температура обработки», взаимодействия «количество ягод крыжовника × температура обработки», «количество ягод крыжовника × продолжительность обработки», «продолжительность обработки × температура обработки» и «количество ягод крыжовника × продолжительность обработки × температура обработки» (сила влияния соответственно 0,3, 2,0, 0,3, 0,6, 3,3 и 0,1%, $p < 0,01$).

Таблица 2 – Влияние количества ягод крыжовника и параметров обработки смеси на оценки органолептических показателей продукта из сливок повышенной жирности

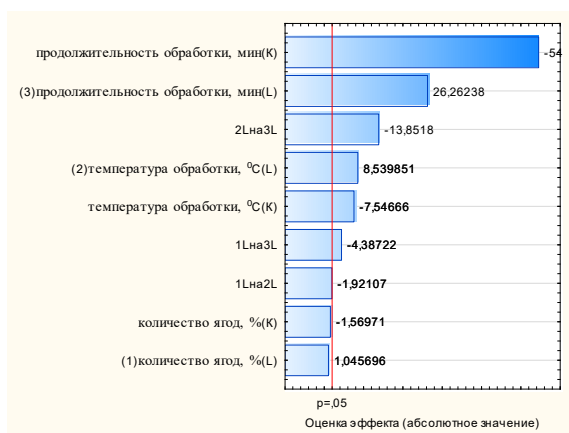
Количество ягод крыжовника, % (x_1)	Температура обработки смеси, °C (x_2)	Продолжительность обработки смеси, мин (x_3)	Внешний вид и консистенция, балл (y_1)	Цвет, балл (y_2)	Запах и вкус, балл (y_3)
10	69	15	0,42±0,05	0,14±0,02	0,64±0,05
10	69	25	1,19±0,03	0,41±0,01	2,52±0,09
10	69	35	1,08±0,02	0,30±0,01	2,40±0,09
10	73	15	0,54±0,05	0,18±0,01	0,86±0,07
10	73	25	1,38±0,02	0,46±0,01	2,88±0,04
10	73	35	1,03±0,03	0,28±0,01	2,18±0,07
10	77	15	0,67±0,04	0,22±0,01	1,12±0,07
10	77	25	1,38±0,02	0,46±0,01	2,64±0,09
10	77	35	0,90±0,04	0,23±0,01	1,88±0,07
12	69	15	0,44±0,03	0,15±0,01	0,67±0,08
12	69	25	1,26±0,02	0,44±0,01	2,76±0,04
12	69	35	1,03±0,03	0,27±0,01	2,36±0,07
12	73	15	0,55±0,04	0,18±0,01	0,89±0,05
12	73	25	1,38±0,02	0,47±0,01	3,00±0,01
12	73	35	0,97±0,03	0,24±0,01	2,05±0,05
12	77	15	0,67±0,03	0,25±0,01	1,12±0,07
12	77	25	1,38±0,02	0,47±0,01	2,94±0,04
12	77	35	0,86±0,04	0,20±0,01	1,69±0,05
14	69	15	0,49±0,04	0,16±0,01	0,74±0,08
14	69	25	1,26±0,02	0,44±0,01	2,88±0,04
14	69	35	0,98±0,03	0,24±0,01	2,28±0,04
14	73	15	0,61±0,04	0,20±0,01	0,97±0,08
14	73	25	1,38±0,02	0,48±0,01	2,88±0,04
14	73	35	0,92±0,03	0,21±0,01	1,87±0,08
14	77	15	0,68±0,03	0,25±0,01	1,24±0,05
14	77	25	1,32±0,05	0,47±0,01	2,64±0,09
14	77	35	0,42±0,05	0,14±0,02	0,64±0,05

Таблица 3 – Матрица корреляции ($p < 0,01$)

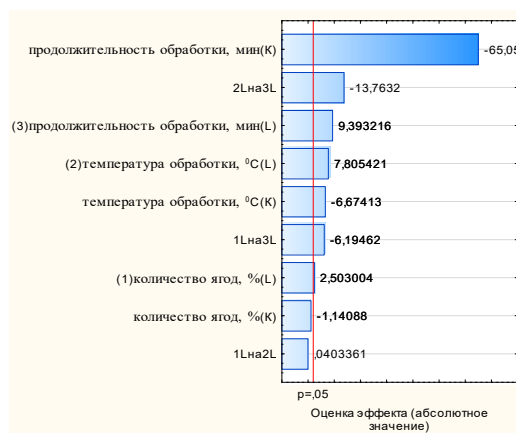
Факторы	Внешний вид и консистенция	Цвет	Запах и вкус
Количество ягод крыжовника, % – x_1 – x_1^2	0,02 -0,02	0,04 -0,02	0,01 -0,04
Температура обработки, °C – x_2 – x_2^2	0,13 -0,12	0,11 -0,10	0,05 -0,09
Продолжительность обработки, мин – x_3 – x_3^2	0,40 -0,84	0,13 -0,93	0,47 -0,81
Количество ягод крыжовника × температура обработки	-0,03	0,00	-0,05
Количество ягод крыжовника × продолжительность обработки	-0,07	-0,09	-0,08
Температура обработки × продолжительность обработки	-0,21	-0,20	-0,21

Таблица 4 – Данные значимости коэффициентов регрессии, адекватности уравнений регрессии

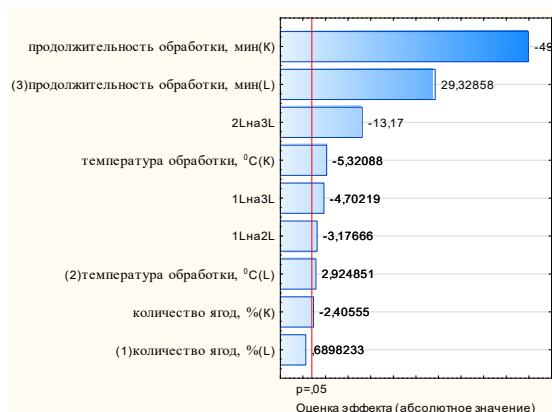
Факторы	Внешний вид и консистенция		Цвет		Запах и вкус	
	t_{cm}	F	t_{cm}	F	t_{cm}	F
Свободный член	-10,61 ($p < 0,01$)	-	-9,47 ($p < 0,01$)	-	-8,58 ($p < 0,01$)	-
Количество ягод крыжовника, %						
$-x_1$	3,00 ($p < 0,01$)	1,09 ($p > 0,05$)	1,54 ($p > 0,05$)	6,27 ($p < 0,05$)	4,50 ($p < 0,01$)	0,48 ($p > 0,05$)
$-x_1^2$	-1,57 ($p > 0,05$)	2,46 ($p > 0,05$)	-1,14 ($p > 0,05$)	1,30 ($p > 0,05$)	-2,41 ($p < 0,01$)	5,79 ($p < 0,01$)
Температура обработки, °C						
$-x_2$	8,61 ($p < 0,01$)	72,93 ($p < 0,01$)	7,50 ($p < 0,01$)	60,93 ($p < 0,01$)	6,42 ($p < 0,01$)	8,56 ($p < 0,01$)
$-x_2^2$	-7,55 ($p < 0,01$)	56,95 ($p < 0,01$)	-6,68 ($p < 0,01$)	44,54 ($p < 0,01$)	-5,32 ($p < 0,01$)	28,31 ($p < 0,01$)
Продолжительность обработки, мин						
$-x_3$	33,14 ($p < 0,01$)	689,71 ($p < 0,01$)	36,46 ($p < 0,01$)	88,23 ($p < 0,01$)	31,20 ($p < 0,01$)	860,17 ($p < 0,01$)
$-x_3^2$	-54,55 ($p < 0,01$)	2975,21 ($p < 0,01$)	-65,05 ($p < 0,01$)	4231,83 ($p < 0,01$)	-50,00 ($p < 0,01$)	2496,48 ($p < 0,01$)
Количество ягод крыжовника × температура обработки	-1,9211 ($p > 0,05$)	3,69 ($p > 0,05$)	0,04 ($p > 0,05$)	0,002 ($p > 0,05$)	-3,18 ($p < 0,01$)	10,09 ($p < 0,01$)
Количество ягод крыжовника × продолжительность обработки	-4,39 ($p < 0,01$)	19,25 ($p < 0,01$)	-6,20 ($p < 0,01$)	38,37 ($p < 0,01$)	-4,70 ($p < 0,01$)	22,11 ($p < 0,01$)
Температура обработки × продолжительность обработки	-13,86 ($p < 0,01$)	191,87 ($p < 0,01$)	-13,76 ($p < 0,01$)	189,43 ($p < 0,01$)	-13,17 ($p < 0,01$)	173,45 ($p < 0,01$)



а) внешний вид и консистенция



б) цвет



в) запах и вкус

Рисунок 1 – Карта Парето оценок органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности

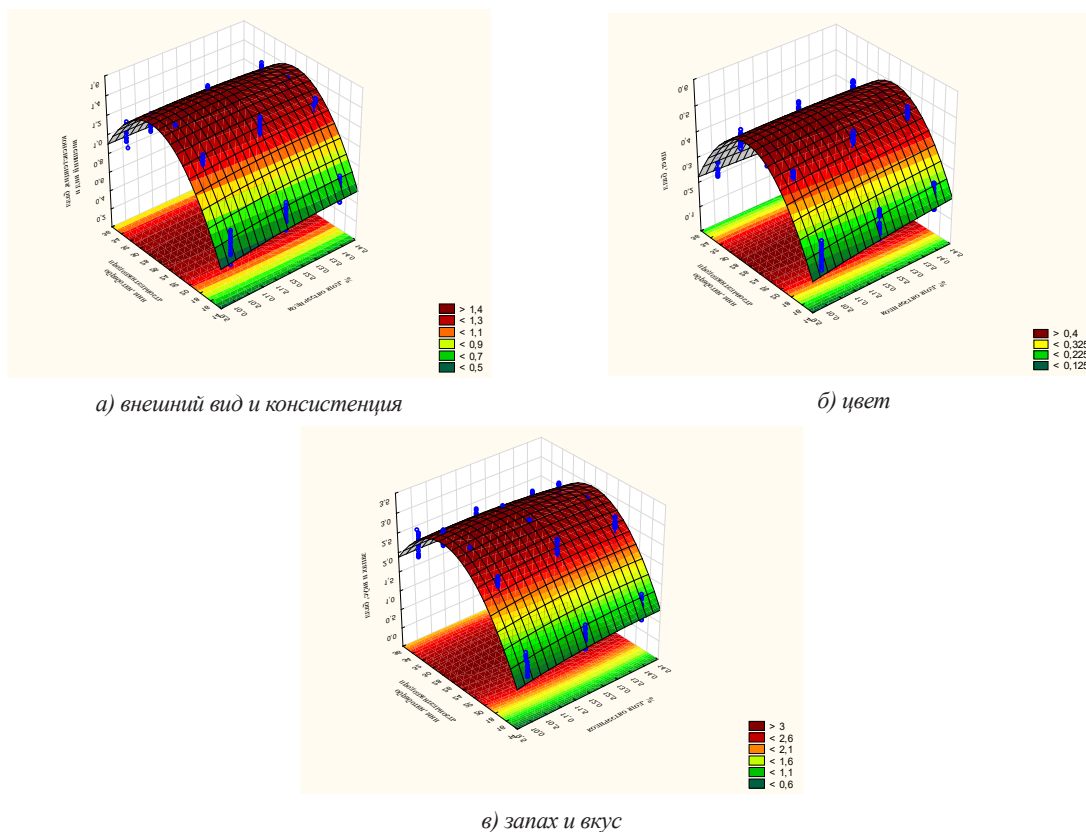


Рисунок 2 – Зависимость оценок органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности от количества ягод крыжовника и продолжительности обработки

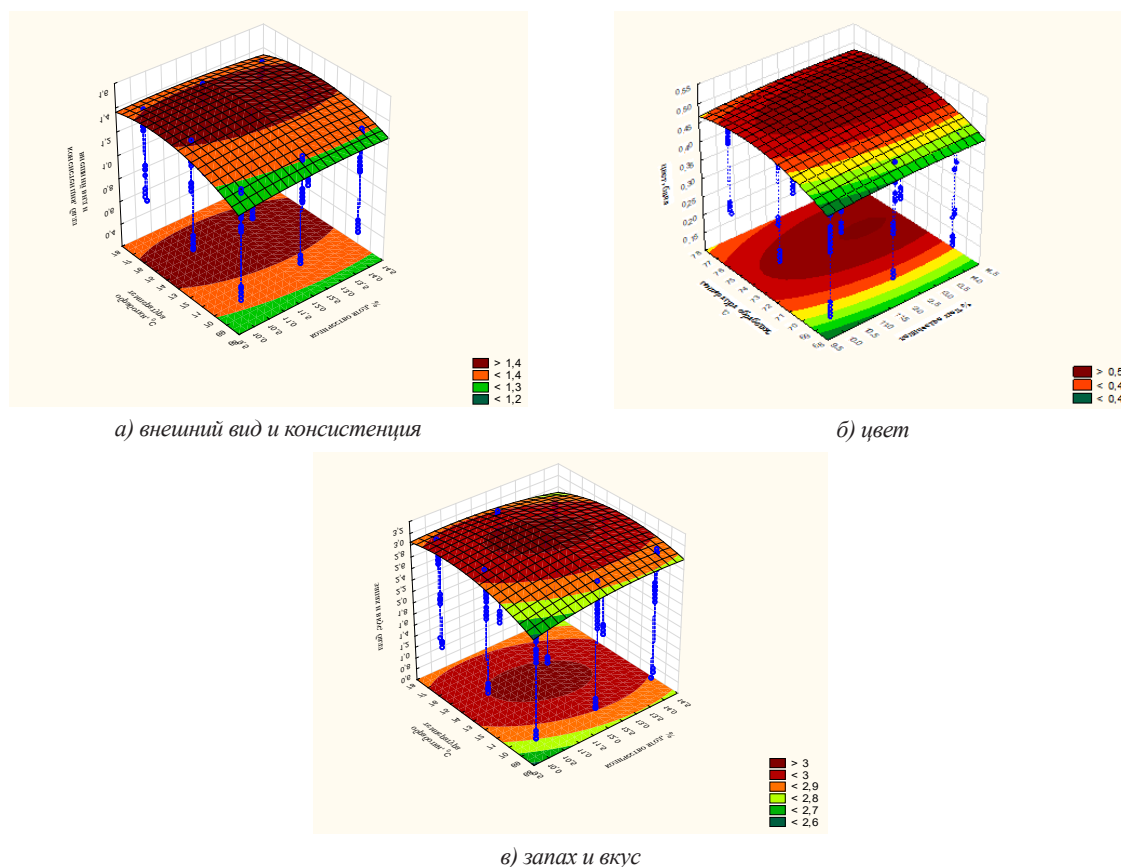


Рисунок 3 – Зависимость оценок органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности от количества ягод крыжовника и температуры обработки

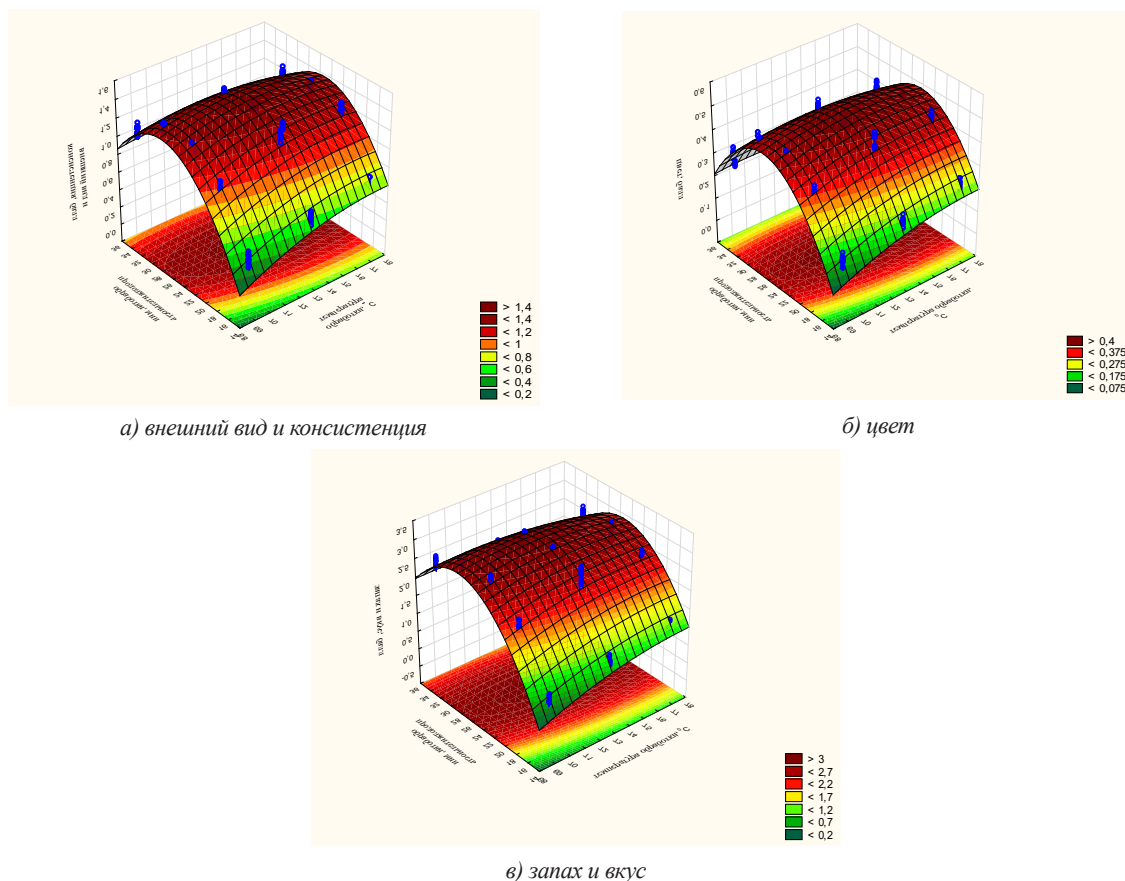


Рисунок 4 – Зависимость оценок органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности от температуры и продолжительности обработки

В результате расчета коэффициентов корреляции установили (табл. 3), что между исследуемыми:

- органолептическими показателями продукта из сливок повышенной жирности и количеством ягод крыжовника/температурой обработки существует слабая положительная связь, а исследуемыми факторами в квадрате слабая отрицательная;
- внешним видом и консистенцией, запахом и вкусом и продолжительностью обработки существует умеренная положительная связь, а исследуемым фактором в квадрате высокая отрицательная, при этом между цветом и исследуемым фактором слабая положительная, фактором в квадрате весьма высокая отрицательная;
- исследуемыми органолептическими показателями и взаимосвязью исследуемых факторов существует слабая отрицательная связь.

Данные таблицы 4 свидетельствуют о значимости коэффициентов регрессии при использовании критерия Стьюдента, и адекватности уравнений (коэффициент детерминации для внешнего вида и консистенции, цвета, запаха и вкуса соответственно $R^2 = 0,95$, $R^2 = 0,96$, $R^2 = 0,94$) при использовании критерия Фишера.

На наш взгляд, процесс формирования органолептических характеристик продукта из сливок повышенной жирности обусловлен структурными изменениями его нутриентного состава за счет

активизации ферментов и других биохимических изменений под воздействием оборудования с роторным аппаратом (пульсационных, ударных и пр.), а также вносимых ягод крыжовника.

Из карт Парето (рис. 1) видно, что на внешний вид и консистенцию продукта из сливок повышенной жирности оказывали влияние факторы «температура обработки» и «продолжительность обработки», «количество ягод × продолжительность обработки» и «продолжительность обработки × температура обработки», поскольку их колонки пересекают вертикальную линию, которая представляет 95%-ную доверительную вероятность. На цвет продукции не оказывали влияние фактор «количество ягод крыжовника», взаимодействия «количество ягод × температура обработки», поскольку их колонки не пересекают вертикальную линию, а остальные исследуемые факторы – оказывали. На запах и вкус продукта из сливок повышенной жирности оказывали влияние практически все исследуемые факторы, за исключением «количество ягод крыжовника».

Анализ графических зависимостей (рис. 2-4) показал, что для изготовления продукта из сливок повышенной жирности следует использовать не менее 10 % ягод крыжовника, температуру и продолжительность обработки в МАГ-50, при скорости вращения диспергатора 2900 об/мин, мешалки 10 об/мин, не менее соответственно 74°C и 19 мин.

Следует отметить, что полученные данные о влиянии количества продуктов переработки плодового сырья, в том числе сорта, и условий технологической обработки, на характеристики качества молочной продукции, в том числе органолептические, согласуются с результатами исследований других авторов [21-25].

Выводы. Исследование направлено на определение оптимальных условий получения продукта из сливок повышенной жирности с использованием методологии построения поверхности отклика, одного из наиболее часто используемых методов оптимизации в науке пищевых систем. Для достижения требуемых органолептических характеристик качества продукта из сливок повышенной жирности установлены наилучшие параметры обработки МАГ-50 (температура не менее 74°C, продолжительность не менее 19 мин при скорости вращения диспергатора 2900 об/мин, мешалки 10 об/мин) и количество добавляемых ягод крыжовника (не менее 10%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Felice V.D., Owens R.A., Kennedy D. et al. Comparative Structural and Compositional Analyses of Cow, Buffalo, Goat and Sheep Cream // *Foods*. – 2021. – Т. 10. – № 11. – С. 2643. – DOI 10.3390/foods10112643.
2. Waldron D.S., Hofmann W., Buchheim W. et al. Role of milk fat in dairy products // *Advanced Dairy Chemistry, Volume 2: Lipids*. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – С. 245-305.
3. Bellassi P., Rocchetti G., Maldarizzi G. et al. Case Study on the Microbiological Quality, Chemical and Sensorial Profiles of Different Dairy Creams and Ricotta Cheese during Shelf-Life // *Foods*. – 2021. – Т. 10. – № 11. – С. 2722. – DOI 10.3390/foods10112722.
4. Mohan M.S., O'Callaghan T.F., Kelly P., Hogan S.A. Milk fat: opportunities, challenges and innovation // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2021. – Т. 61. – № 14. – С. 2411-2443. – DOI 10.1080/10408398.2020.1778631.
5. Thum C., Roy N.C., Everett D.W., McNabb W.C. Variation in milk fat globule size and composition: A source of bioactives for human health // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2021. – Т. 63. – № 1. – С. 87-113. – DOI 10.1080/10408398.2021.1944049.
6. Данильчук, Т.Н. Инновационные продукты на основе сливок с антиоксидантной активностью и гепатопротекторными свойствами / Т.Н. Данильчук, Ю.Г. Новосад, Е.А. Бережная // *Health, Food & Biotechnology*. – 2022. – Т. 4, № 2. – С. 48-58. – DOI 10.36107/hfb.2022.i2.s136.
7. Современная биотехнология производства молочного десерта с функциональными ингредиентами / С.А. Коновалов, Н.Б. Гаврилова, К.К. Полянский [и др.] // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2024. – Т. 86, № 1(99). – С. 70-83. – DOI 10.20914/2310-1202-2024-1-70-83.
8. Демина Е.Н. Оптимизация рецептуры мороженого методом симплекс-решетчатого планирования / Е.Н. Демина, Н.А. Березина, А.В. Казаков // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2021. – № 1. – С. 104-116. – DOI 10.36107/spfp.2021.192.
9. Tong Q., Yan S., Wang S., Xue J. Optimization of process technology and quality analysis of a new yogurt fortified with *Morchella esculenta* // *Food Science and Technology*. – 2022. – Т. 42. – С. e45822. – DOI 10.1590/fst.45822.
10. dos Santos Rocha C., Magnani M., Ramos G.L.D.P.A. et al. Emerging technologies in food processing: Impacts on sensory characteristics and consumer perception // *Current Opinion in Food Science*. – 2022. – Т. 47. – С. 100892. – DOI 10.1016/j.cofs.2022.100892.
11. Carrillo-Lopez L.M., Garcia-Galicia I.A., Tirado-Gallegos J.M. et al. Recent advances in the application of ultrasound in dairy products: Effect on functional, physical, chemical, microbiological and sensory properties // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – Т. 73. – С. 105467. – DOI 10.1016/j.ultsonch.2021.105467.
12. Nikmaram N., Keener K. M. The effects of cold plasma technology on physical, nutritional, and sensory properties of milk and milk products // *Lwt*. – 2022. – Т. 154. – С. 112729. – DOI 10.1016/j.lwt.2021.112729.
13. Mohamad A., Shah N.N.A.K., Sulaiman A. et al. The Impact of Pulsed Electric Fields on Milk's Macro- and Micronutrient Profile: A Comprehensive Review. *Foods*. 2023; 12(11):2114. – DOI 10.3390/foods12112114.
14. Биологическая ценность плодов и ягод российского производства / М.Ю. Акимов, В.В. Бессонов, В.М. Колденцова и др. // *Вопросы питания*. – 2020. – Т. 89. – № 4. – С. 220-232. DOI 10.24411/0042-8833-2020-10055.
15. Ярахмедова Д.А. Инновационная технология производства компота из вишни и крыжовника с использованием ЭМП СВЧ и ступенчатой высокотемпературной стерилизации в аппаратах открытого типа / Д.А. Ярахмедова, А.Ф. Демирова, М.Э. Ахмедов // *Проблемы развития АПК региона*. – 2024. – № 3(59). – С. 195-201. – DOI 10.52671/20790996_2024_3_195.
16. Левгерев, Н.С. Новые сорта плодовых и ягодных культур селекции ВНИИСПК для производства натуральных продуктов питания / Н.С. Левгерев, Е.С. Салина, И.А. Сидорова // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. – 2020. – № 4. – С. 33-37. – DOI 10.30850/vrsn/2020/4/33-37.
17. Лимонникова С.Г. Разработка новых видов пресервов с соусом из плодов крыжовника / С.Г. Лимонникова, Н.А. Величко // *Вестник КрасГАУ*. – 2021. – № 4(169). – С. 127-132. – DOI 10.36718/1819-4036-2021-4-127-132.
18. Зубова Е.В. Биологическая ценность фруктовых купажных вин на основе ягод крыжовника и земляники садовой / Е.В. Зубова, Т.В. Залетова // *Вестник Нижегородского государственного агротехнологического университета*. – 2023. – № 2(38). – С. 59-64.
19. Долматова О.И. Изучение реологических свойств структурированного молокосодержащего продукта / О.И. Долматова // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2021. – Т. 83, № 3(89). – С. 168-173. – DOI 10.20914/2310-1202-2021-3-168-173.
20. Новый кисломолочный соус / О.В. Голуб, Е.М. Лобачева, И.В. Романовская, Т.С. Габерман // *Молочная промышленность*. – 2010. – № 11. – С. 58.
21. Effect of heat treatment on micronutrients, fatty acids and some bioactive components of milk / M. Kilic-Akyilmaz, B. Oze- ra, T. Bulat, A. Topcu // *International Dairy Journal*. – 2022. – V. 126. – P. 105231. – DOI 10.1016/j.idairyj.2021.105231.
22. Incorporation of Blue Honeysuckle Juice into Fermented Goat Milk: Physicochemical, Sensory and Antioxidant Characteristics and In Vitro Gastrointestinal Digestion / J. Ma, Y. Miao, J. Li et al. // *Foods*. – 2022. – V. 11. – № 19. – P. 3065. – DOI 10.3390/foods11193065.
23. Microbiological, Physicochemical and Nutritional Properties of Fresh Cow Milk Treated with Industrial High-Pressure Processing (HPP) during Storage / S.H. Lim, N.L. Chin, A. Sulaiman et al. // *Foods*. – 2023. – V. 12. – № 3. – P. 592. – DOI 10.3390/foods12030592.
24. Physico-Chemical, Microbiological and Sensory Properties of Water Kefir Drinks Produced from Demineralized Whey and Dimrit and Shiraz Grape Varieties / H. Şafak, I. Gün, M. Tudor Kalit, S. Kalit // *Foods*. – 2023. – V. 12. – № 9. – P. 1851. – DOI 10.3390/foods12091851.
25. The Impact of Thermal Treatment Intensity on Proteins, Fatty Acids, Macro/Micro-Nutrients, Flavor, and Heating Markers of Milk - A Comprehensive Review / Y. Wang, R. Xiao, S. Liu et al. // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2024. – V. 25. – № 16. – P. 8670. – DOI 10.3390/ijms25168670.

Статья поступила в редакцию 16.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 663.326

EDN: HJFBVE

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ АКТИВАЦИИ СУХИХ ДРОЖЖЕЙ ПРИ СБРАЖИВАНИИ ЯБЛОЧНОГО СОКА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8646-8247

AuthorID: 272604

ORCID: 0000-0003-3102-7313

Researcher ID: N-1415-2018

ScopusID: 41860888800

БЕЛОКУРОВА Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы биотехнологий
и пищевых производств Института биомедицинских систем и биотехнологий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 литера Б, e-mail: belokurova_es@spbstu.ru)

SPIN: 7223-1342

AuthorID: 713897

ORCID: 0000-0002-5981-2076

ResearcherID: N-1368-2018

ScopusID: 9045119900

ПАНКИНА Илона Анатольевна, кандидат технических наук, доцент Высшей школы биотехнологий
и пищевых производств Института биомедицинских систем и биотехнологий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29 литера Б, e-mail: pankina_ia@spbstu.ru)

Аннотация. Слабоалкогольные напитки брожения занимают большую долю на потребительском рынке Российской Федерации и пользуются стабильным спросом у населения. В последние годы кроме пива большое распространение получили напитки на основе яблочного сока такие, как сидр. Для нашей страны это актуально, так в разных регионах выращивается большое количество яблок, которые необходимо перерабатывать. Если производством пива занимаются преимущественно крупные предприятия, то сидр производят на предприятиях малой мощности. При работе на подобных предприятиях иногда отсутствует цех чистой культуры для размножения дрожжей, а производители используют сухие дрожжи. Для сокращения начальной стадии сбраживания яблочного сусла большое значение имеет скорость активации дрожжей. Цель исследования – выбрать оптимальный питательный субстрат для активации сухих дрожжей при производстве сидра. Из субстратов были выбраны имеющиеся на производстве. Активировали дрожжи и наблюдали за скоростью активации в течение 100 минут. Скорость активации сухих дрожжей определяли микробиологическими методами прямой микроскопии прижизненных окрашенных и неокрашенных препаратов и количественного подсчета клеток арбитражными методами. Результаты исследования показывают, что при использовании сухих дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* GV13, рекомендованные для сидра, лучшей питательной средой для активации является субстрат, состоящий из питьевой воды и яблочного сока в соотношении 1:1.

Ключевые слова: яблочный сок, сухие дрожжи, микробиологические методы исследования, спиртовое брожение, сидр, показатели качества.

OPTIMIZATION CONDITIONS FOR ACTIVATION OF DRY YEAST DURING APPLE JUICE FERMENTATION

© The Author(s) 2025

BELOKUROVA Elena Sergeevna, phd, associate professor

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B, e-mail: belokurova_es@spbstu.ru)

PANKINA Iona Anatolyevna, phd, associate professor

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29 B, e-mail: pankina_ia@spbstu.ru)

Abstract. Low-alcohol fermented beverages occupy a large share of the consumer market of the Russian Federation and are in stable demand among the population. In recent years, in addition to beer, apple juice-based beverages such as cider have become widespread. This is relevant for our country, since a large number of apples are grown in different regions, which need to be processed. While beer is mainly produced by large enterprises, cider is produced at small-scale enterprises. When working at such enterprises, there is sometimes no pure culture workshop for yeast propagation, and producers use dry yeast. To reduce the initial stage of apple must fermentation, the rate of yeast activation is of great importance. The aim of the study was to select the optimal nutrient substrate for activating dry yeast in cider production. The substrates available at the production facility were selected. The yeast was activated and the activation rate was observed for 100 minutes. The activation rate of dry yeast was determined by microbiological methods of direct micros-

copy of vital stained and unstained preparations and quantitative cell counting using arbitration methods. The results of the study show that when using dry yeast *Saccharomyces cerevisiae* GV13, recommended for cider, the best nutrient medium for activation is a substrate consisting of drinking water and apple juice in a ratio of 1:1.

Keywords: apple juice, dry yeast, microbiological research methods, alcoholic fermentation, cider, quality indicators.

Для цитирования: Белокурова Е.С. Оптимизация условий активации сухих дрожжей при сбраживании яблочного сока / Е.С. Белокурова, И.А. Панкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 100-105. – EDN: HJFBBE.

Введение. В настоящее время в Российской Федерации одной из самых высокоразвитых отраслей биотехнологической промышленности является дрожжевое производство. Наша страна лидирует по объемам выпуска дрожжей на европейском континенте: около 15% всех дрожжей, производимых в Европе, выращиваются отечественными производителями [1].

В нашей стране основными потребителями этих одноклеточных микроорганизмов являются хлебозаводы. Хлеб относится к продуктам ежедневного потребления, поэтому где выше плотность населения, там и больше хлебозаводов. В связи с этим большинство предприятий-производителей дрожжей находится на европейской части территории Российской Федерации, они выпускают более 50% всех дрожжей [1]. Дрожжи используются в хлебопечении, пивоварении, виноделии и в производстве слабоалкогольных напитков брожения таких, как медовуха, сидр, пуаре, а также при получении бражки в спиртовом производстве. Кормовые дрожжи, например род *Candida* культивируются для кормопроизводства.

Технологи хлебопекарной и бродильной промышленности на своих производствах работают с жидкими заквасками, прессованными и сухими дрожжами. Крупные производители напитков брожения сами занимаются размножением этих одноклеточных микроорганизмов и накоплением их биомассы. На предприятиях в лабораторных условиях из пробирки с чистой культурой выращивают дрожжевые клетки в колбах, которые затем передают в цех чистой культуры. В таких цехах наращивают биомассу дрожжей и затем направляют их в бродильные цеха на производство. Если из жидкой дрожжевой закваски удалить часть влаги, то получатся прессованные дрожжи.

По себестоимости жидкие и прессованные дрожжи имеют относительно невысокую цену, так как эти микроорганизмы хорошо размножаются и накапливают биомассу на дешевых субстратах. Одними из главных недостатков являются сроки и условия хранения полученной дрожжевой биомассы. Так, жидкие дрожжевые закваски хранятся очень короткое время и в условиях холодильного хранения. Жидкие дрожжи обычно не перевозятся на большие расстояния. При транспортировке прессованных дрожжей необходимы авторефрижераторы, так как температура должна быть от -3°C до +5°C. Также к

недостаткам жидких и прессованных дрожжей можно отнести их достаточно большие объемы [2].

Впервые сухие дрожжи появились в 20-е годы XX века, благодаря удобству в использовании они получили быстрое распространение в Европе и в Америке [4]. В Российской Федерации сушёные дрожжи впервые появились более 30 лет назад и получили большое распространение на предприятиях малой мощности. Преимущества сухих дрожжей: длительные сроки хранения, не требуют специальных условий хранения, занимают мало места при хранении, поэтому их легко транспортировать [5, 6]. В промышленных условиях даже прессованные дрожжи перед использованием активируют. Для сухих дрожжей необходимо затрачивать больше времени на их активацию. В настоящее время разработаны и успешно применяются различные способы активации в зависимости от имеющегося на предприятии оборудования [7, 8].

Самым распространенным способом активации дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в бродильных производствах является применение ультразвука [9-12].

В настоящей работе осуществляли подбор оптимальных условий для активации сухих дрожжей при производстве сидра.

Объектами исследования в данной работе являлись сырье и готовый продукт. Основное сырье: сок яблочный и сухие дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* GV13, рекомендованные для сидра, производителя *Muntons*. Готовый продукт – сброженный яблочный сок.

Методология. При выполнении исследований в лабораторных условиях получали яблочный сок методом прямого отжима с помощью бытовой соковыжималки торговой марки *RED Solution J940*. Для отжима использовали яблоки сорта «Слава победителям», выращенные в Выборгском районе Ленинградской области. Данный сорт яблок по своим характеристикам рекомендован для производства сидровых материалов [13, 14]. Яблоки собирали для переработки после достижения ими технической степени зрелости, которую определяли по внешнему виду и по массовой доли растворимых сухих веществ в соке. Содержание сухих веществ определяли с помощью рефрактометра марки ИРФ-454 Б2М. Одним из показателей, влияющим на протекание процесса ферментации и на качество готового продукта, является титруемая кислотность, характеризующая количественное содержание органических кислот. Ее

устанавливали арбитражным методом в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 750-2013 Продукты переработки фруктов и овощей. Определение титруемой кислотности. Для этого оттитровывали полученный напиток слабым раствором щелочи 0,1 н концентрации, в качестве индикатора использовали фенолфталеин.

Приготовленный методом прямого отжима сок яблочный сок подвергали пастеризации при температуре 85°C в течение 15 минут во избежание инфицирования посторонней микрофлорой. Отпастеризованный сок охлаждали до температуры ферментации, вносили дрожжи и ставили на брожение. Конечный продукт – сброженное яблочное сусло, приготовленное по классической технологии сидра.

Основное внимание в данной работе было уделено подготовке сухих дрожжей. Перед началом процесса брожения сухие дрожжи подвергали регидратации. Для этого использовали разные растворы: образец 1 активировали в 5% растворе сахарозы, растворенной в питьевой воде; образец 2 активировали в смеси яблочного сока и питьевой воды в соотношении 1:1; образец 3 активировали в натуральном яблочном соке. Температура активации была одинаковая и составляла 20,0±2°C.

Наиболее благоприятные условия для протекания процесса активации *Saccharomyces cerevisiae* устанавливали экспериментальным путем методом прямой микроскопии приготовленных суспензий и количественного учета прироста клеток, накопленных через каждые 20 минут в течение периода экспозиции дрожжей в модельных субстратах, а также по процентному соотношению почкующихся и мертвых клеток в полученной дрожжевой суспензии.

Количество клеток считали в камере Горяева по методу Егорова. За процессом регидратации наблюдали в течение 100 минут. При определении количества почкующихся клеток готовили прижизненный неокрашенный препарат «раздавленная капля». При определении количества мертвых клеток прижизненный препарат окрашивали простым

способом с помощью метиленового синего. При этом мертвые клетки окрашивались в темно-синий цвет, так как у мертвых клеток цитоплазматическая мембрана отходит от клеточной стенки пропускает краску внутрь. Живые клетки оставались неокрашенными [15].

После активации дрожжей проводили процесс сбраживания яблочного сока и получали сидр.

Полученный после брожения напиток исследовали по органолептическим и физико-химическим показателям в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58851-2020 «Сидры фруктовые традиционные. Технические условия». [16]. С помощью дегустации сначала определяли органолептические показатели качества. Дегустацию проводили в количестве 15 человек разного пола, возраст 22-45 лет. Физико-химические показатели ферментированного яблочного сока устанавливали ускоренным методом с помощью прибора «Колос-2». (производитель ООО НПП «Биомер»). Прибор предназначен для экспресс-метода анализа слабоалкогольных напитков брожения. Перед заполнением камеры прибора в соответствии с инструкцией пробу сброженного сока подготавливали следующим образом: удаляли углекислый газ механическим способом на качалке и отфильтровывали от дрожжевых клеток.

Результаты. Органолептические показатели качества приготовленного яблочного сока представлены в таблице 1.

В свежееотжатом яблочном соке наиболее значимые для технологического процесса брожения показатели: содержание сухих веществ и титруемая кислотность. В нашем образце содержание сухих веществ составило 11,2±0,2%, что является хорошим показателем для соков прямого отжима. Титруемая кислотность сока – 0,5% (в пересчете на яблочную кислоту).

Все эксперименты проводили в 3-х повторностях. Динамика изменения количества клеток дрожжей за весь период активации в модельных субстратах представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Органолептические показатели качества приготовленного яблочного сока

Наименование показателя	Характеристика показателя
Внешний вид	Однородная, хорошо гомогенизированная, непрозрачная жидкость с равномерно распределенной по всему объему тонкоизмельченной мякотью, которая при отстаивании сока осаждалась на дне емкости.
Вкус и аромат	Ярко-выраженные, сбалансированные, характерные для яблочного сока, без признаков порчи.
Цвет	Темно-желтый, насыщенный, однородный по всей массе.

Таблица 2 – Количество клеток *Saccharomyces cerevisiae*, накопившееся в разных модельных субстратах за время активации

Наименование образца	Количество дрожжевых клеток на начало процесса активации, млн в 1 мл	Количество дрожжевых клеток на конец процесса активации, млн в 1 мл	Прирост количества клеток, млн в 1 мл
5 % раствор сахарозы	2,31·10 ⁶	4,11·10 ⁶	1,80·10 ⁶
Яблочный сок +питьевая вода в соотношении 1:1	2,02·10 ⁶	7,91·10 ⁶	5,90·10 ⁶
Яблочный сок	1,88·10 ⁶	5,38·10 ⁶	3,40·10 ⁶

Такой показатель как прирост количества клеток не всегда дает правильное представление о протекании процесса ферментации. Для технологов бродильных производств наиболее значимыми являются вегетативные дрожжевые клетки, так как они способны к размножению и отражают истинное физиологическое состояние дрожжевой биомассы. Поэтому при проведении исследований мы проводили дополнительно подсчет почкующихся клеток и мертвых клеток *Saccharomyces cerevisiae*.

Результаты определения количества почкующихся дрожжевых клеток при активации в разных

питательных средах представлены на диаграмме рисунка 1.

Количество отмерших клеток дрожжей при проведении процесса активации в разных субстратах представлены на диаграмме рисунка 2.

Исследование количества мертвых дрожжевых клеток показало, что процесс отмирания дрожжей начался с 80-й минуты.

Предполагаем, что это связано с истощением питательной среды и накоплением токсичных продуктов метаболизма таких, как этиловый спирт и углекислый газ (рис. 2).

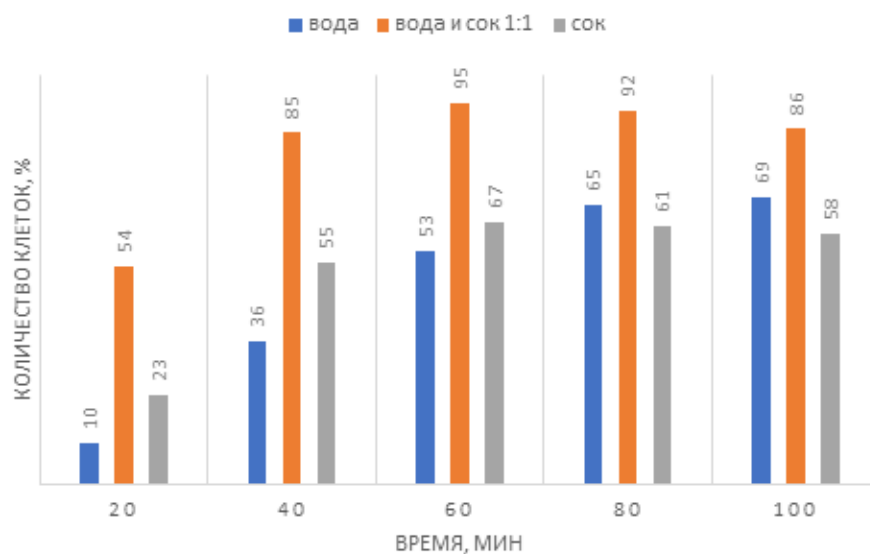


Рисунок 1 – Количество почкующихся дрожжевых клеток на стадии активации в разных субстратах, %

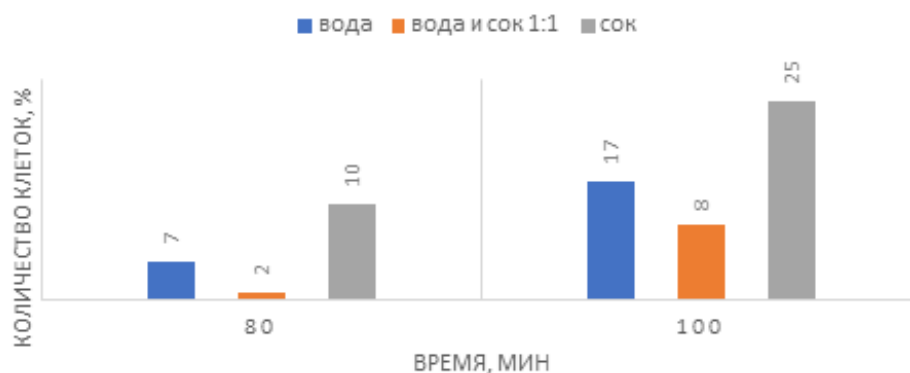


Рисунок 2 – Количество мертвых дрожжевых клеток к концу стадии активации в разных субстратах, %

Обсуждение. По результатам проведенных нами исследований получается, что приготовленный методом прямого отжима сок из яблок сорта «Слава победителям», собранных в стадии технической зрелости, не только имел высокие функционально-технологические показатели качества, но и отвечал требованиям ГОСТ Р 702.1.003-2020 «Сок яблочный. Потребительские испытания» и может быть рекомендован к использованию в качестве сидровых виноматериалов [17], так как содержит необходимое количество углеводов и органических кислот, опти-

мальное для роста и размножения дрожжей. Обзор иностранных источников литературы показал, что яблочный сок с полученными нами характеристиками используется в качестве сырья для сидра во многих странах [18-20]. Это особенно приятно, так как яблоки выращены в Северо-Западном регионе, где из-за климатических условий не всегда удастся набрать необходимое количество сахаров.

Анализ данных, представленных на диаграмме рисунка 1 показывает, что наилучшие условия для размножения дрожжей созданы в образце 2: сок +

питьевая вода в соотношении 1:1.

Анализ данных, представленных на диаграмме рисунка 2 показывает, что в этом же образце было обнаружено наименьшее количество мертвых клеток. Проверка на наличие мертвых дрожжевых клеток показала, что клетки начали отмирать с 80-й минуты. Предполагаем, что это связано с истощением питательной среды (рис. 2).

На основании полученных результатов для дальнейших исследований использовали активированные сухие дрожжи образца 2, которые вносили в яблочный сок, полученный методом прямого отжима, и получали сидр по классической технологии. По окончании процессов главного брожения и дображивания анализировали готовый напиток.

По органолептическим показателям сброженное яблочное сусло было хорошо осветлено, насыщенного желтого цвета, имело чистый яблочный аромат без посторонних ароматов: дрожжевого, спиртового, кислого, затхлого, плесневелого, гниlostного. Было сбалансировано на вкус и имело среднюю степень насыщения углекислым газом без обильного пенообразования.

Результаты определения физико-химических показателей качества сброженного яблочного сусла: объемная доля этилового спирта $-5,76 \pm 0,2\%$; остаточный экстракт $-2,33 \pm 0,2\%$; количество остаточных сахаров в остаточном экстракте $-2,26 \pm 0,2\%$; плотность $-0,9956$ г/мл.

Таким образом, приготовленный из яблочного сока на активированных дрожжах напиток по органолептическим и физико-химическим показателям в соответствии с ГОСТ Р 58851-2020 «Сидры фруктовые традиционные. Технические условия» можно отнести к сидру. А по количеству остаточных сахаров можно сделать заключение, что получился сухой сидр.

Выводы. Высушенные дрожжевые клетки способны сбродить яблочный сок до сидра, но для сокращения продолжительности забраживания их необходимо подвергнуть процессу активации:

- при проведении процесса активации высушенных дрожжевых клеток важная роль отводится процессу регидратации, который в разных субстратах протекает по-разному: наибольшая скорость размножения дрожжей была отмечена в питательной среде яблочный сок с питьевой водой в соотношении 1:1, поэтому в такой среде увеличение количества дрожжевых клеток происходило быстрее, чем в других субстратах;

- в этой же питательной среде накопилось наибольшее количество дрожжевой биомассы, поэтому для активации сухих дрожжей производителям можно рекомендовать питательный субстрат, состоящий из питьевой воды и яблочного сока в соотношении 1:1;

- низкая степень активации дрожжей в растворе сахарозы можно объяснить тем фактом, что яблочный сок содержит преимущественно моносахариды такие как фруктоза и глюкоза и совсем мало саха-

розы. Выбранный штамм дрожжей плохо сбраживает дисахариды;

- приготовленный яблочный сок с содержанием сухих веществ $11,2 \pm 0,2\%$, и титруемой кислотностью $0,5\%$ (в пересчете на яблочную кислоту) имел хорошие функционально-технологические показатели качества для успешного протекания процесса ферментации и накопления необходимого количества продуктов метаболизма. Это свидетельствует о том, что яблоки сорта «Слава победителям», собранные в стадии технической зрелости, могут быть использованы для производства слабоалкогольных напитков брожения;

- применение разработанной методики активации сухих дрожжей позволило приготовить слабоалкогольный напиток, соответствующий требованиям ГОСТ Р 58851-2020 «Сидры фруктовые традиционные. Технические условия» по объемной доле этилового спирта;

- по содержанию сахаров получился сухой сидр, что свидетельствует о высокой степени сбраживания экстрактивных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Анализ рынка дрожжей в России. Текущая ситуация и прогноз 2024-2028 гг. Источник: <https://alto-group.ru/otchof/rossija/320-rynok-drozhzhej-v-rossii-tekuschaja-situacija-i-prognoz-2020-2024-gg.html>.
2. Биотехнология продуктов растительного происхождения: Учебное пособие / Е.С. Белокурова, О.Б. Иванченко. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2024. – 232 с.
3. Белокурова Е.С., Севастьянова А.Д., Севастьянова Ю.Д. Исследование качества сухих дрожжей Материалы международной научно – практической конференции, посвященной 110-летию с дня рождения доктора ветеринарных наук, профессора Есютина Александра Васильевича. Актуальные вопросы импортозамещения в сельском хозяйстве и ветеринарной медицине, 31 марта 2016 г. – Троицк: Южно-Уральский ГАУ, 2016. – С. 20-23.
4. Ламберова, М.Э. Дрожжи: учебное пособие / М.Э. Ламберова; Алт. гос. техн. ун-т БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2012. – 95 с.
5. Меледина Т.В., Давыденко С.Г. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Морфология, химический состав, метаболизм: Учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 88 с.
6. Панкина И.А., Черникова Д.А. Хлебопекарные дрожжи: характеристика и изучение их физико-химических показателей. Сборник материалов междунар. науч.-практич. конференции «Проблемы конкурентоспособности потребительских товаров и продуктов питания» (12 апреля 2019 г.). – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2019 – С. 241-244.
7. Лукина, О.В., Лукина, Д.В. Анализ способов и технических средств, предназначенных для активации хлебопекарных дрожжей / О.В. Лукина, Д.В. Лукина // Вестник Курганской ГСХА. – 2013. – № 4 (8). – С. 82-84.
8. Сакина, Д.М. Способы активации прессованных дрожжей с применением нетрадиционного растительного сырья / Д.М. Сакина, Е.И. Кошкина, С.А. Леонова // Инновационные технологии и технические средства для АПК. – 2016. – С. 186-190.
9. Gernet MV, Gribkova IN, Borisenko OA. Исследование возможности активации дрожжей при приготовлении ферментированных напитков (the yeast activation possibility study in the fermented beverages preparation). Пищевая промышленность. 2020;8:56-59. (In Russ.). DOI: 10.24411/0235-2486-2020-10087.
10. Bodrov A.J. Влияние ультразвука на пивоваренные дрожжи (the effect of ultrasound on brewing yeast). Вестник ВГУИТ. 2020;82:103-109. (In Russ.). DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-103-109.
11. Kaluzhina OY, Krechetnikova AN, Smirnova IV, Gusev

AN, Nafikova AR. Alcohol technology intensification with the application of ultrasound. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019;19(Suppl.2):98-104.

12. Soro AB, Oliveira M, O'Donnell CP, Tiwari BK. Ultrasound assisted modulation of yeast growth and inactivation kinetics. Ultrasonics Sonochemistry. 2021;80:105819. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105819.

13. Войцеховский В.И., Токарь А.Е., Ребезов М.Б. Качество сидровых материалов в зависимости сорта яблок и расы дрожжей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2, № 4.

14. Кошкина А.С., Альшевский Д.Л. Совершенствование технологии яблочного сидра с использованием дикорастущих плодов и ягод Калининградской области // Известия КГТУ. – 2021. – № 62.

15. Белокурова Е.С., Иванченко О.Б., Жилинская Н.Т. Классические микробиологические методы исследования в оценке безопасности сырья и пищевой продукции Санкт-Петербург: Троицкий мост, 2019 г ISBN: 978-5-4377-0138-6.

16. ГОСТ Р 58851-2020 «Сидры фруктовые традиционные. Технические условия». – М.: Стандартинформ, 2020. – 12 с.

17. ГОСТ Р 702.1.003-2020 «Российская система качества. Сок яблочный. Потребительские испытания». – М.: Стандартинформ, 2020. – 6 с.

18. Warkollier G, The Principles and practice of cider-Making / G. Warkollier // London: Leonard Hill Ltd – 2008, 286 p.

19. Watson B, Cider, Hard and Sweet: History, Traditions, and Making Your Own (Third Edition)/B. Watson // Countryman Press; Third edition – 2013, 208p.

20. Mascall L, The Fruit Manual, (Fifth Edition)/ L. Mascall // quoted in Beach – 2010, 263p.

Статья поступила в редакцию 22.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 338.4

EDN: GZRQAR

**ПОТЕРИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ХРАНЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ПРОДУКЦИИ В СВЕТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АПК**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 2577-5850

AuthorID: 1027269

ORCID: 0000-0002-2009-8856

ScopusID: 58766242300

АББАЗОВА Венера Нагимовна, старший преподаватель
кафедры управления качеством и экспертизы товаров и услуг
Уральский государственный экономический университет

(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной Воли, 62/45, e-mail: abbazova@usue.ru)

Аннотация. Актуальность и важность исследования рынков продовольствия и сырья обусловлены их значимостью для обеспечения национальной и региональной продовольственной безопасности. Рациональное и эффективное планирование производства продовольственных ресурсов, учитывающее показатели их экспорта и импорта, способствует решению ключевых социально-экономических задач, таких как обеспечение населения необходимыми продуктами питания и сырьем, а также поддержание экономического и продовольственного суверенитета. Продовольственные потери и пищевые отходы, возникающие на всех этапах цепочки поставок – от производства до потребления, являются одной из ключевых проблем современного мира, включая Россию. Данная статья представляет собой комплексное исследование проблемы продовольственных потерь, направленное на разработку практических мер по их сокращению. Решение проблемы продовольственных потерь в сельском хозяйстве требует комплексного подхода, включающего улучшение технологий, развитие инфраструктуры, обучение кадров и государственную поддержку. Реализация предложенных мер позволит значительно повысить эффективность сельскохозяйственного производства и снизить потери на всех этапах цепочки поставок.

Ключевые слова: продовольственный рынок, сельскохозяйственное сырье, АПК, продовольственная безопасность, продовольственные потери, устойчивое развитие, пищевая промышленность.

**LOSSES IN PRODUCTION AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS IN LIGHT
OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

© The Author(s) 2025

ABBAZOVA Venera Nagimovna, senior lecturer of the department
of quality management and expertise of goods and services
Ural State University of Economics

(620144, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, 8 Marta/Narodnaya Volya st., 62/45, e-mail: abbazova@usue.ru)

Abstract. The relevance and importance of studying food and raw material markets are due to their significance for ensuring national and regional food security. Rational and effective planning of food production, taking into account their export and import indicators, helps to solve key socio-economic problems, such as providing the population with the necessary food products and raw materials, as well as maintaining economic and food sovereignty. Food losses and food waste that occur at all stages of the supply chain - from production to consumption - are one of the key problems of the modern world, including Russia. This article is a comprehensive study of the problem of food losses, aimed at developing practical measures to reduce them. Solving the problem of food losses in agriculture requires an integrated approach, including improving technology, developing infrastructure, training personnel and government support. The implementation of the proposed measures will significantly improve the efficiency of agricultural production and reduce losses at all stages of the supply chain.

Keywords: food market, agricultural raw materials, agro-industrial complex, food security, food losses, sustainable development, food industry.

Для цитирования: Аббазова В.Н. Потери при производстве и хранении сельскохозяйственной продукции в свете устойчивого развития АПК / В.Н. Аббазова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 106-112. – EDN: GZRQAR.

Введение. Проблема продовольственных потерь и пищевых отходов является одной из наиболее значимых глобальных проблем современности. В условиях роста населения планеты и ограниченности природных ресурсов, вопросы эффективного использования продуктов питания становятся все

более актуальными. Продовольственные потери возникают на всех этапах цепочки поставок – от производства до потребления, что приводит к значительным экономическим, экологическим и социальным последствиям. В развитых странах порядка 20-40% пищевых отходов образуется на

этапе производства в цепочках поставок и зачастую управляется неоптимальным способом, что приводит к дополнительному негативному воздействию на окружающую среду.

Согласно данным Росстата, в Российской Федерации ежегодно теряется около 25-30% производимой сельскохозяйственной продукции. Эти потери происходят не только в процессе выращивания культур, но и на стадиях хранения, транспортировки, переработки и реализации.

Продовольственные потери в России имеют множество негативных последствий, в том числе экономические убытки для производителей, переработчиков и торговых организаций, экологические проблемы, связанные с утилизацией; социальные последствия, такие как повышение цен на продукты питания и снижение доступности качественных продуктов для населения. Кроме того, значительные объемы потерянной продукции могут привести к снижению уровня продовольственной безопасности страны, особенно в условиях нестабильной международной обстановки.

При этом тенденции развития АПК страны все больше включают в себя контекст целей устойчивого развития (ЦУР) ООН [1]. Взаимосвязь между целями устойчивого развития и проблемой продовольственных потерь сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации можно рассмотреть через призму нескольких ключевых аспектов: обеспечение продовольственной безопасности, улучшение питания и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства. Так, Цель 2 ориентирована на ликвидацию всех видов недоедания, формирование устойчивых продовольственных систем, а также внедрение сельскохозяйственных практик, которые увеличивают продуктивность, сохраняют экосистемы, усиливают адаптацию к изменениям климата, экстремальным погодным условиям, таким как засухи и наводнения, и последовательно улучшают состояние земель и почв. Цель 12 направлена на обеспечение более эффективного использования ресурсов и переход к устойчивым, рациональным моделям производства и потребления. Потери продовольствия тесно связаны с нерациональным расходом природных ресурсов, включая воду, землю и энергию, а снижение потерь поможет более эффективно управлять данными ресурсами, способствуя устойчивому развитию национальной экономики.

Этот тезис подтверждается новыми научными исследованиями, в которых подчеркивается важность изучения взаимосвязи между устойчивым развитием территорий, обеспечением продовольственной безопасности и уровнем благосостояния населения [2, 3]. Сокращение потерь и отходов продовольствия станет важным шагом на пути к повышению продовольственной безопасности, а также повысит эффективность использования ресурсов при производстве и реализации продукции [4-6].

Разработка теоретико-методологических под-

ходов к изучению рынка продовольственных товаров и сырья рассмотрена множеством отечественных и зарубежных авторов как в контексте общего рынка, так и применительно к отдельным отраслевым рынкам, включая рынок продовольствия.

Наиболее значимым фактором, определяющим сохранность сельскохозяйственной продукции, является соблюдение условий хранения [7]. Оптимальный температурный режим помогает сохранить исходные свойства продукции и ее безопасность. Также на хранение продукции влияют относительная влажность воздуха и освещение. Черепанов А.Ю. рассматривает и характеризует различные виды процессов, происходящих с пищевой продукцией во время хранения. По результатам проведенного исследования автором сделан вывод о самом распространенном факторе, влияющем на сохранность пищевой продукции – температура воздуха в помещении [8].

Совершенствование логистической деятельности в процессе организации транспортировки продуктов питания все чаще предполагает внедрение инновационных цифровых технологий, таких как искусственный интеллект, позволяющий решать задачи разработки и применения программ для оптимизации логистических процессов, а также способствующий качественному развитию систем взаимодействия между различными компонентами логистической системы. Матерова Е.С. и др. в исследовании рассматривают наиболее востребованные технологические решения, применяемые в сфере управления логистикой и организацией транспортировки пищевой продукции [9].

Методология. Целью исследования является анализ причин возникновения продовольственных потерь на различных этапах сельскохозяйственного производства, а также выявление возможных путей их минимизации. Особое внимание уделено проблемам, связанным с потерями в сельском хозяйстве, перерабатывающей промышленности и торговле.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- изучение причины возникновения продовольственных потерь на разных этапах сельскохозяйственного производства (выращивание, сбор урожая, хранение);
- анализ влияния технологических процессов на уровень потерь при переработке сельскохозяйственной продукции;
- оценка роли инфраструктуры и логистики в возникновении потерь при транспортировке и хранении пищевых продуктов;
- исследование факторов, способствующих возникновению потерь в розничной торговле;
- разработка рекомендаций по минимизации продовольственных потерь на каждом этапе цепочки поставок.

В работе использованы методы синтеза, анализа данных, визуализации. Информационная база предс-

тавлена официальными данными Росстата за период с 2015 по 2023 гг. и других источников информации, необходимых для анализа текущего состояния проблемы и выявления существующих подходов к её решению.

Результаты. Показатели потребления основных продуктов питания позволяют оценить, насколько рацион населения соответствует рекомендациям диетологов и специалистов в области здравоохранения. Например, если потребление фруктов и овощей ниже рекомендуемых норм, это может указывать на риски для здоровья, связанные с недостатком витаминов и микроэлементов. Также данные о потреблении основных продуктов питания помогают производителям и поставщикам планировать объемы производства и поставок, чтобы удовлетворить спрос на рынке. Рассмотрим динамику показателя

потребления основных продуктов питания в России (табл. 1) и изменение индекса сельскохозяйственного производства (рис. 1).

По данным таблицы 1 нормы потребления основных продуктов питания в стране практически по всем категориям не соответствуют нормам Минздрава, так потребление сахара составляет в среднем 39 кг/год/чел, что значительно превышает рекомендуемую рациональную норму потребления пищевых продуктов, отвечающую современным требованиям здорового питания. Согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (FAO), потребление полуфабрикатов, избыточного количества жиров и сахара может привести к ожирению, неинфекционным заболеваниям и снижению производительности труда [10].

Таблица 1 – Потребление основных продуктов питания по Российской Федерации на душу населения в год, кг*

Наименование пищевых продуктов	Рациональные нормы потребления пищевых продуктов	2019	2020	2021	2022	2023
Мясо и мясопродукты в пересчете на мясо	74	75	76	77	78	80
Молоко и молочные продукты в пересчете на молоко	322	232	238	239	241	247
Яйца и яйцепродукты – штук	260	283	281	279	288	290
Рыба и рыбопродукты	28	21,0	19,9	21,0	19,2	22,6
Сахар	8	39	39	38	39	39
Масло растительное	12	13,9	13,8	13,5	13,8	13,8
Картофель	90	88	86	83	84	86
Овощи и продовольственные бахчевые культуры	140	107	106	103	104	105
Фрукты и ягоды	100	61	61	62	63	66
Хлебные продукты (хлеб и макаронные изделия в пересчете на муку, мука, крупа и бобовые)	97	115	114	113	113	112

* по данным Росстата, Министерства здравоохранения Российской Федерации



Рисунок 1 – Индекс сельскохозяйственного производства (в сопоставимых ценах к предыдущему году, %) (по данным Росстата)

Снижение индекса сельскохозяйственного производства обусловлено влиянием различных факторов, включая экономические факторы, технологические особенности и другие внешние воздействия. Изменения в макроэкономической среде, такие как инфляция, рост процентных ставок по кредитам, рост цен на удобрения, топливо, семена и другие необходимые для ведения сельского хозяйства материалы приводят к уменьшению инвестиций в модернизацию оборудования, сокращение площадей под посевы и общее снижение производства.

Сельское хозяйство играет ключевую роль в обеспечении продовольствием населения, однако

на этом этапе цепочки поставок происходит значительное количество потерь. Рассмотрим основные причины потерь на трех ключевых этапах: выращивание, сбор урожая и хранение.

На стадии выращивания сельскохозяйственные культуры подвергаются различным рискам, которые могут привести к потере части урожая еще до сбора. Неблагоприятные погодные явления, такие как засуха, наводнения, град, сильные ветры и заморозки, могут существенно снизить урожайность. Например, в регионах с недостаточным количеством осадков фермерские хозяйства сталкиваются с проблемой нехватки воды для полива, что ведет

к уменьшению количества и качества урожая. Инфекции, вызванные грибами, бактериями или вирусами, наличие насекомых-вредителей, могут уничтожить значительную часть посевов. Отсутствие своевременного контроля за состоянием растений может привести к серьезным потерям. Недостаток удобрений, питательных веществ в почве, неэффективность агротехнических мероприятий могут негативно сказаться на росте и развитии растений, снижая общую урожайность. Механическое повреждение растений при обработке полей сельскохозяйственной техникой также снижает общий объем собранного урожая.

Потери, возникающие при несвоевременном сборе урожая, условно делят на 2 группы: потери от раннего сбора (недозревшие плоды), и потери от позднего сбора (перезревшие плоды, которые быстро портятся). Использование устаревшей техники или неправильная настройка оборудования для механизированного сбора может повредить растения и плоды во время сбора. Несортированные и некалиброванные плоды часто отбраковываются при дальнейшей переработке или продаже, что увеличивает общие объем потерь. Немаловажным фактором, влияющим на риск возникновения потерь при сборе урожая, является недостаточная подготовка персонала, что также может привести к ошибкам и повреждениям сельскохозяйственной продукции.

После сбора урожая важно обеспечить надлежащие условия для его хранения, чтобы минимизировать порчу и потерю качества сельскохозяйственной продукции. Особенно это касается фруктов и овощей, которые требуют специальных условий хранения. Высокая влажность, неподходящая температура или отсутствие вентиляции могут ускорить процессы гниения и порчи продукции. Правильный выбор типа упаковки позволит защитить продукцию от внешних воздействий, в том числе и при транспортировке [10]. Недостаточно развитая инфраструктура и длительное хранение без использования современных технологий, такое как складирование в амбарах или подвалах, приводит к потерям из-за отсутствия контроля над условиями окружающей среды. Отсутствие специализированных хранилищ, холодильников и других объектов инфраструктуры затрудняет эффективное хранение больших объемов продукции, увеличивая вероятность её порчи.

При переработке сельскохозяйственной продукции, например, тыквы или других бахчевых культур, могут возникать различные виды потерь, основными причинами которых являются механические повреждения, делающие продукт непригодным для дальнейшей переработки или снижающие его качество; транспортировка на склад или перерабатывающий завод, при которой плоды могут подвергаться ударам и давлению, особенно если они перевозятся без должной защиты; заражение грибами и бактериями (плоды тыквы подвержены различным заболеваниям, таким как гниль, плесень и бактериальные инфекции); недостаточная техническая оснащенность

(устаревшее оборудование не обеспечивает должную очистку, резку или измельчение тыквы, что увеличивает процент отходов); отсутствие современных технологий (современные методы обработки, такие как вакуумная упаковка или использование специальных консервантов, могут продлить срок годности продукта и уменьшить потери); нарушение условий хранения и товарного соседства (хранение тыквы рядом с другими продуктами, которые выделяют этилен (например, яблоки), ускоряет созревание и порчу тыквы); человеческий фактор (ошибки персонала при обработке и переработке тыквы, несоблюдение санитарных норм); экономические факторы (в случае избыточного урожая цены на продукцию падают, и производители могут отказаться от переработки части урожая, считая это экономически невыгодным).

Инфраструктура и логистика играют немаловажную роль в сохранении качества сельскохозяйственной продукции на этапах транспортировки и хранения [11]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO) до 40% потерь сельскохозяйственной продукции приходится на этапы транспортировки и хранения [12].

Рассмотрим основные аспекты роли инфраструктуры и логистики в возникновении потерь.

1. Роль инфраструктуры в сохранении качества сельскохозяйственной продукции на этапах транспортировки и хранения:

- наличие современных складских помещений с регулируемым микроклиматом (температурой, влажностью, вентиляцией) критично для поддержания качества продукции. Недостаточность складских мощностей может вынудить производителей хранить продукцию в ненадлежащих условиях, что увеличивает риск потерь [13];
- транспортная инфраструктура: дороги и транспортные маршруты, наличие специализированного транспорта;
- энергетическая инфраструктура: бесперебойное электроснабжение, необходимое для функционирования холодильных установок, систем кондиционирования воздуха и другого оборудования, поддерживающего оптимальные условия хранения;
- инженерные коммуникации: водоснабжение и канализация.

2. Роль логистики в сохранении качества сельскохозяйственной продукции на этапах транспортировки и хранения:

- организация перевозок: Выбор оптимального маршрута транспортировки должен учитывать минимальное время в пути, должную инфраструктуру и минимизацию рисков повреждения продукции. Задержки в пути могут привести к ухудшению качества продукции, особенно если речь идет о скоропортящихся товарах. Например, задержка с доставкой охлажденной рыбы или мяса может привести к их порче;
- управление запасами и использование системы *Just-in-time*, предполагающей доставку продукции

точно в срок, что минимизирует необходимость длительного хранения и снижает риск потерь;

- правильно подобранная упаковка защищает продукцию от механических повреждений, проникновения влаги и других внешних воздействий. Низкокачественная упаковка может привести к повреждениям и порче продукции. Четкая и корректная маркировка позволяет отслеживать сроки годности продукции, условия хранения и транспортировки;
- организация и проведение мониторинга и контроля за условиями хранения и транспортировки. Скоропортящиеся товары требуют строгого контроля температуры на всех этапах транспортировки и хранения. Использование систем *GPS* позволяет отслеживать местонахождение груза в реальном времени, что также помогает контролировать сроки доставки и минимизировать задержки.

Исследование факторов, способствующих возникновению продовольственных потерь в розничной торговле, направлено на выявление причин, приводящих к порче, списанию или утилизации продуктов питания до момента их продажи конечному потребителю. К таким факторам относятся:

- транспортировка и логистика на предприятиях торговли, включая риски возникновения повреждения при погрузочных или разгрузочных работах, а также внеплановые задержки в пути, связанные с поломкой транспорта, дорожными или погодными осложнениями;
- условия хранения сельскохозяйственной продукции в складских помещениях и торговых залах (температурный режим, влажность, циркуляция воздуха, оснащенность складов и торговых залов);
- маркетинговая стратегия предприятия и управление спросом (переоценка спроса на определенные виды сельскохозяйственной продукции, ценовая политика, ошибки в выборе маркетинговой стратегии приводят к накоплению излишков);
- человеческий фактор (некомпетентность персонала, выражающая в ошибках при сортировке, упаковке, хранении и реализации продукции);
- регуляторные и законодательные факторы (требования к маркировке и сертификации, санитарные нормы и стандарты).

Обсуждение. Разработка эффективных мер по предотвращению и минимизации продовольственных потерь способствует повышению эффективности сельского хозяйства и улучшению продовольственной безопасности страны (табл. 2).

Механизированная уборка урожая тыквенных культур позволяет ускорить процесс сбора урожая, уменьшить затраты труда и минимизировать риски повреждений плодов во время ручных операций.

Основными преимуществами механизации уборки тыквенных культур являются:

- скорость и производительность;
- снижение затрат на рабочую силу;
- минимизация повреждений;
- повышение точности;
- управление качеством.

Однако, эффективное функционирование процесса ограничивается рядом проблем:

- высокая стоимость оборудования;
- необходимость адаптации оборудования к местным условиям (климатические особенности, рельеф местности, тип почвы и др.);
- дополнительное обучение персонала;
- риски повреждения урожая при механизированной уборке.

В настоящее время в США и Европе широко используются специализированные комбайны для уборки тыкв, оснащенные специальными захватывающими устройствами, которые аккуратно отделяют плод от стебля и помещают его в контейнер, а в Японии и Китае активно внедряются роботы и автоматизированные системы для ухода за растениями и сбора урожая, включая тыквенные культуры [16].

Решение проблемы продовольственных потерь в сельском хозяйстве требует комплексного подхода, включающего модернизацию технологий, развитие инфраструктуры, обучение кадров и государственную поддержку. Реализация предложенных мер позволит значительно повысить эффективность сельскохозяйственного производства и снизить потери на этапах выращивания, сбора урожая и его хранения.

Перерабатывающие предприятия используют разнообразные стратегии и технологии для минимизации потерь при переработке сельскохозяйственной продукции. Наиболее эффективными методами являются использование автоматизированных систем отбора, исключающих поврежденные или некачественные плоды еще на этапе сбора урожая, использование специализированных транспортных средств, оборудованных системами поддержания оптимальной температуры и влажности при перевозке, использование современных технологий хранения (создание оптимальных условий хранения с контролируемым температурным режимом, влажностью и циркуляцией воздуха), использование вакуумной упаковки, внедрение автоматизированных систем контроля качества (системы машинного зрения позволяют автоматически сортировать продукцию по размеру, цвету и наличию дефектов, а спектральные анализаторы определяют химический состав продукции и выявляют потенциальные дефекты, такие как скрытые инфекции), использование современных технологий переработки (ультразвуковая и микроволновая обработка), рециркуляция и утилизация отходов (вторичная переработка и компостирование).

Эти подходы помогают перерабатывающим предприятиям существенно сократить потери при переработке сельскохозяйственной продукции, повысить экономическую эффективность и обеспечить высокое качество конечных продуктов.

Для уменьшения продовольственных потерь сельскохозяйственной продукции в розничной торговле рекомендуется применять следующие меры:

- внедрение автоматизированных систем управления запасами и прогнозирования спроса [17, 18].
- использование возможностей искусственного интеллекта для повышения контроля качества на этапе закупки сельскохозяйственной продукции у поставщиков и проведения регулярного мониторинга состояния продукции на складах, овощехранилищах, распределительных центрах крупных торговых сетей (разработка программ для анализа изображений плодов овощей и фруктов) [19].
- модернизация складской инфраструктуры и

улучшение условий хранения продукции.

- повышение квалификации сотрудников, ответственных за хранение, транспортировку и реализацию продукции.

– организация сотрудничества с благотворительными фондами для передачи нереализованной, но пригодной к употреблению продукции [20].

- применение современных технических решений в переработке продовольственного сырья и использование современной упаковки, в том числе smart и активной [21, 22].

Таблица 2 – Разработка мер по предотвращению и минимизации продовольственных потерь в сельском хозяйстве

Фактор	Меры по предотвращению и минимизации продовольственных потерь в сельском хозяйстве	
	Наименование	Характеристика
Климатические условия	Агрометеорологическое прогнозирование	Современные системы мониторинга позволяют предсказывать изменения погоды и своевременно принимать меры для защиты посевов
	Использование устойчивых сортов растений	Выведение и внедрение сортов, способных противостоять засухе, морозам, болезням и другим стрессовым факторам, помогает уменьшить риски потерь
	Применение систем орошения	Установка капельного орошения или других эффективных методов полива позволяет поддерживать оптимальный водный режим для растений, независимо от климатических условий
	Создание защитных сооружений	В районах с сильными ветрами или градом можно устанавливать защитные экраны или сетки, чтобы предотвратить механические повреждения растений
Борьба с болезнями и вредителями	Интегрированная система защиты растений (ИСЗР)	Комплексный подход включает мониторинг состояния посевов, применение биологических средств защиты, использование пестицидов строго по необходимости и соблюдение правил агротехники
	Биологическая защита	Применение биопрепаратов вместо химических пестицидов помогает снизить ущерб и сохранить экологическую безопасность
	Раннее обнаружение и профилактика	Регулярный осмотр полей и лабораторные анализы помогают вовремя выявить заболевания и принять соответствующие меры
Оптимизация агротехнических мероприятий	Рациональное использование удобрений [14]	Применение сбалансированных доз минеральных и органических удобрений, а также точное определение сроков внесения
	Севооборот и междурядная обработка	Чередование культур и правильная обработка междурядий улучшают структуру почвы и снижают риск заболеваний
	Минимализация обработки почвы	Использование методов минимальной обработки почвы
Совершенствование технологий сбора урожая	Оптимальные сроки сбора	Определение точного времени сбора урожая на основе зрелости плодов и погодных условий
	Модернизация уборочной техники	Использование современной техники с высокой точностью работы и минимальным повреждением растений
	Квалификация персонала	Повышение квалификации работников, занятых в сборе урожая
Улучшение условий хранения и транспортировки	Развитие инфраструктуры хранения	Строительство современных хранилищ с регулируемой температурой, влажностью и вентиляцией
	Использование современных упаковочных материалов [15]	Специальные материалы, защищающие продукцию от механических повреждений и воздействия внешней среды
	Логистические инновации	Оптимизация маршрутов доставки и использование современных транспортных средств с системами охлаждения и вентиляции
Государственная поддержка и образовательные программы	Финансовая поддержка фермеров	Предоставление субсидий и льготных кредитов на приобретение современного оборудования и технологий
	Образовательные программы	Проведение семинаров и тренингов о новых методах и технологиях для фермеров и специалистов аграрной сферы
	Научно-исследовательская деятельность	Поддержка научных исследований в области агрономии, биотехнологий и экологии

* составлено автором

Выводы. Продовольственные потери в сельском хозяйстве обусловлены влиянием множества факторов, начиная от погодных климатических условий и заканчивая недостаточной инфраструктурой и низким уровнем осведомленности персонала. Грамотный анализ причин возникновения потерь

позволяет разработать меры по их предотвращению и минимизации, что в итоге способствует повышению эффективности сельского хозяйства и улучшению продовольственной безопасности страны.

Решение проблемы продовольственных потерь в сельском хозяйстве требует комплексного подхода,

включающего улучшение технологий, развитие инфраструктуры, обучение кадров и государственную поддержку. Реализация предложенных мер позволит значительно повысить эффективность сельскохозяйственного производства и снизить потери на всех этапах цепочки поставок.

Инвестиции в модернизацию инфраструктуры, использование современных технологий переработки сельскохозяйственной продукции и растительного сырья, улучшение транспортной сети и внедрение современных логистических решений позволяют существенно снизить уровень потерь и повысить эффективность сельскохозяйственного производства.

Разработка и внедрение программ для автоматического анализа изображений плодов овощей и фруктов позволит добиться более высокой точности оценки качества сельскохозяйственной продукции, снизит вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, ускорит процессы проверки и сортировки плодов, что повысит общую эффективность работы предприятий пищевой промышленности и сферы торговли. Своевременное выявление некачественных плодов овощей и фруктов позволит предприятиям сократить продовольственные потери, а также расходы на утилизацию испорченной продукции, и повысить безопасность продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ким В.В., Галактионова Е.А., Антонец К.В. Продовольственные потери и пищевые отходы на потребительском рынке РФ // IACJ. 2020. – №4.
2. Shlyapina M. V., Tretyakova E. A. (2024). A nexus between regional welfare and sustainable development: A conceptual model. *Journal of New Economy*, vol. 25, no. 4. – P. 85-105. DOI: 10.29141/2658-5081-2024-25-4-5. EDN: QDAZRJ.
3. Науменко, Н.В. Продовольственные потери и пищевые отходы в контексте устойчивости продовольственных систем: понятийный аппарат и его применимость / Н.В. Науменко, В.В. Ботвинникова, Е.Е. Науменко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2020. – Т. 8, № 3. – С. 5-11. – DOI 10.14529/food200301. – EDN FBCCVE.
4. Ahmed, M.; Asim, M.; Raza, A. Investigating the potential of reducing food losses and waste within the agricultural value chain to improve food security and resource efficiency, in *Proceedings of the 4th International Electronic Conference on Agronomy*, 2-5 December 2024, MDPI: Basel, Switzerland.
5. Abdelrahman Ali, Chunping Xia, N'Banan Ouattara, Irfan Mahmood, Muhammad Faisal, Economic and environmental consequences' of postharvest loss across food supply Chain in the developing countries, *Journal of Cleaner Production*, Volume 323, 2021, 129146, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129146>.
6. Q.D. Read, S.Brown, A.D. Cuéllar, S.M. Finn, J.A. Gephart, L.T. Marston, E. Meyer, K.A. Weitz, M.K. Muth, Assessing the environmental impacts of halving food loss and waste along the food supply chain, *Science of The Total Environment*, Volume 712, 2020, 136255, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136255>.
7. Гиссин, В.И. Снижение потерь в процессе жизненного цикла семечковых культур / В.И. Гиссин, М.Н. Наливайко // Новые концептуальные подходы к решению глобальной проблемы обеспечения продовольственной безопасности в современных условиях : сборник научных статей, Курск, 17 ноября 2023 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 22-25. – EDN BJBSOS.
8. Черепанов, А.Ю. Процессы, происходящие в пищевых товарах при хранении / А.Ю. Черепанов, Н.Л. Лопатова // Молодежь и наука. – 2023. – № 1. – EDN PFFSCM.
9. Матерова, Е.С. Совершенствование логистических технологий при транспортировке пищевых продуктов / Е.С. Матерова, Ю.А. Соков, Р.И. Маликов // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 11(172). – С. 700-703. – DOI 10.34925/EIP.2024.172.11.121. – EDN AHEYHD.
10. M. Brander, T. Bernauer, M. Huss, Improved on-farm storage reduces seasonal food insecurity of smallholder farmer households – Evidence from a randomized control trial in Tanzania, *Food Policy*, Volume 98, 2021, 101891, ISSN 0306-9192, <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101891>.
11. Khan, Ayesha & Siddiqui, Yasmeen & Siddique, Kadam-bot & Bobo, Jack & Ali, Asgar. (2024). Minimizing postharvest food losses: a vital strategy to alleviate food insecurity and malnutrition in developing nations: a review. *Discover Food*. 4. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00129-0>.
12. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО) – The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Режим доступа: <https://www.fao.org/home/ru>.
13. Карх, Д.А. Перспективы развития региональных экономических и продовольственных систем / Д.А. Карх, В.Н. Аббазова, М.Н. Школьников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 55-65. – DOI 10.14529/em230305. – EDN VPCMYL.
14. Липатова, Н.Н. Состояние и тенденции развития сельскохозяйственного производства в России / Н.Н. Липатова // Самара АгроВектор. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 2-7. – DOI 10.55170/29493536_2022_2_4_2. – EDN BMHYCW.
15. Fernandez, C.M., Alves, J., Gaspar, P.D., Lima, T.M. and Silva, P.D. (2023), Innovative processes in smart packaging. A systematic review. *J Sci Food Agric*, 103: 986-1003. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11863/>
16. Мартынов, А.С. Способ повышения эффективности складского хозяйства сельскохозяйственного предприятия / А.С. Мартынов, М.П. Смирнов // Молодежь и инновации: Материалы XIX Всероссийской (национальной) научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Чебоксары, 10 марта 2023 года. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2023. – С. 478-482. – EDN FKQJNU.
17. M.C. Annosi, F. Brunetta, F.Bimbo, M.Kostoula, Digitalization within food supply chains to prevent food waste. Drivers, barriers and collaboration practices, *Industrial Marketing Management*, Volume 93, 2021, Pages 208-220, ISSN 0019-8501, <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.01.005>.
18. G. Chaboud, P. Moustier, The role of diverse distribution channels in reducing food loss and waste: The case of the Cali tomato supply chain in Colombia, *Food Policy*, Volume 98, 2021, 101881, ISSN 0306-9192, <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101881>.
19. Аббазова В.Н., Копнин А.А., Школьников М.Н., Рожнов Е.Д. Применение нейронных сетей и компьютерного зрения для оценки качества тыквы: обзор мировых тенденций и технологий // *Дневник науки*. 2024. – №12.
20. I.Y. Huang, L. Manning, K.L. James, V. Grigoriadis, A. Millington, V. Wood, S. Ward, Food waste management: A review of retailers' business practices and their implications for sustainable value, *Journal of Cleaner Production*, Volume 285, 2021, 125484, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125484>.
21. Чугунова О.В., Заворохина Н.В. Современные технические решения использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем: монография / О.В. Чугунова, Н.В. Заворохина. – Курск: Университетская книга, 2024. – 178 с. : ил. – Библиогр.: С. 162-178 (147 назв.). – 500 экз. – ISBN 978-5-907916-27-2. – Текст (визуальный) : непосредственный.
22. Малинин А.В., Потороко И.Ю., Рускина А.А. Разработка ультразвуковой технологии получения биоматериалов-сенсоров для упаковки пищевых продуктов // *Индустрия питания|Food Industry*. – 2024. – Т. 9, № 4. – С. 5-12. DOI: 10.29141/2500-1922-2024-9-4-1. EDN: VMTIKB.

Статья поступила в редакцию 18.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 543.554, 634, 664.8

EDN: WSYUXK

**ВЛИЯНИЕ АНТИОКСИДАНТНОГО ПОТЕНЦИАЛА СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ
НА СОХРАННОСТЬ УРБЕЧЕЙ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7663-1784

Author ID: 450578

ORCID: 0000-0002-4777-1465

Researcher ID: C-3922-2018

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: 0000-0000-7981-9008

КОРЧЕМКИНА Елена Юрьевна, аспирант*Уральский государственный экономический университет**(620144, Россия, Екатеринбург, улица 8 Марта/Народной воли, 62/45, e-mail: elenalux83@mail.ru)*

Аннотация. Разработка урбечей с использованием в качестве сырьевых компонентов дикоросов с разным антиоксидантным потенциалом позволила установить минимальные сроки годности. Задачи исследований заключались в определении рецептурного состава по данным органолептической оценки, измерении антиоксидантной активности и показателей окислительной порчи при хранении до 105 сут. Антиоксидантную активность (АОА), зависящую от вида сырья, исследовали потенциометрическим методом. Наибольшее значение АОА установлено в свежеприготовленных урбечах из фундука $2,41 \pm 0,01$ мМ-Экв и в урбечах из фундука с добавлением облепихового жома и в урбечах из кедрового ореха с добавлением облепихового жома $3,49 \pm 0,03$ мМ-экв и $1,04 \pm 0,01$ мМ-экв соответственно. При хранении на периоде с 30 сут. до 105 сут. наибольшее снижение АОА произошло в урбечах из фундука с добавлением облепихового и рябинового жома и черемуховой муки на 8,2 %, 5,0 % и 2,6 % соответственно, а также при добавлении облепихового жома в урбечи из фундука на 8,2 % и в урбечи из кедрового ореха – на 6,9%. Выявлена корреляция между снижением АОА и повышением кислотного и перекисного чисел, как индикаторов происходящих в урбечах окислительных процессов в процессе хранения. Наибольшая динамика повышения кислотного числа наблюдалась в урбечах из фундука, отличающегося повышенным содержанием ненасыщенных жирных кислот – на 0,12-0,19 мг КОН/г, и динамика повышения перекисного числа на 0,10-0,97 ммоль активного кислорода/кг. По данным показателей окислительной порчи подтвержден нерегламентируемый в настоящее время нормативными документами срок годности урбечей. Требуется продолжение исследований по обоснованию сроков годности на основе физико-химических и микробиологических показателей урбечей в процессе хранения.

Ключевые слова: урбечи, антиоксиданты, антиоксидантная активность, потенциометрический метод, фундук, кедровые орехи, облепиха, рябина, черемуха.

**THE EFFECT OF THE ANTIOXIDANT POTENTIAL OF RAW MATERIALS
ON THE SAFETY OF CANDLES**

© 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)***KORCHEMKINA Elena Yurievna**, phd student*(620144, Russia, Yekaterinburg, 8 Marta Street/Narodnaya Volya, 62/45, e-mail: elenalux83@mail.ru)*

Abstract. The development of urbechs using wild plants with different antioxidant potential as raw materials made it possible to establish minimum shelf life. The research objectives were to determine the formulation based on organoleptic evaluation data, measure antioxidant activity and oxidative damage during storage for up to 105 days. The antioxidant activity (AOA), depending on the type of raw material, was investigated by the potentiometric method. The highest AOA value was found in freshly prepared hazelnut urbechs of 2.41 ± 0.01 mM-Eq and in hazelnut urbechs with the addition of sea buckthorn pulp and cedar nut urbechs with the addition of sea buckthorn pulp of 3.49 ± 0.03 mM-eq and 1.04 ± 0.01 mM-eq, respectively. When stored for a period from 30 days to 105 days, the greatest decrease in AOA occurred in hazelnut urbechs with the addition of sea buckthorn and rowan pulp and cherry flour by 8.2%, 5.0% and 2.6%, respectively, as well as when sea buckthorn pulp was added to hazelnut urbechs by 8.2% and cedar nut urbechs – by 6.9%. Correlations have been revealed between a decrease in AOA and an increase in acid and peroxide numbers, as indicators of oxidative processes occurring in urbechs storage. The greatest dynamics of the increase in the acid number

was observed in urbechs from hazelnuts, characterized by an increased content of unsaturated fatty acids – by 0.12-0.19 mg KOH/g and the dynamics of an increase in the peroxide number by 0.10-0.97 mmol of active oxygen/kg. According to the indicators of oxidative damage, the expiration date of urbech, which is currently unregulated by regulatory documents, has been confirmed. Further research is required to substantiate the shelf life based on the physico-chemical and microbiological parameters of urbech during storage.

Keywords: urbechi, antioxidants, antioxidant activity, potentiometric method, hazelnuts, pine nuts, sea buckthorn, mountain ash, wild cherry.

Для цитирования: Тимакова Р.Т. Влияние антиоксидантного потенциала сырьевых компонентов на сохранность урбечей / Р.Т. Тимакова, Е.Ю. Корчемкина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 113-119. – EDN: WSYUXK.

Введение. Производство пищевой продукции функционального назначения с заданными характеристиками качества в результате обогащения ценными нетрадиционными сырьевыми компонентами, содержащими биологически активные вещества, отвечает принципам здорового питания человека [1]. При этом важное значение приобретает не только предрасположенность на основе пищевых привычек населения к определенному набору пищевых продуктов, но и формирование новых пищевых потребностей по виду продукции, пищевой и биологической ценности для конкретного индивидуума.

Убечи – аутентичный продукт дагестанской национальной кухни, который традиционно производится ремесленным способом из орехового сырья для собственного потребления. В последние годы отмечается интерес к продукту за пределами республики и, соответственно на потребительском рынке представлен более широкий ассортимент урбечей с добавлением различных частей растений, плодово-ягодного сырья, очищенных семян подсолнечника и тыквы, ядер орехов и косточковых плодов, меда, сахара, патоки, что требует регламентации сроков годности. Представленные на потребительском рынке урбечи, вырабатываемые на предприятиях малого и среднего предпринимательства, производятся по технологиям, закрепленным техническими условиями с указанием срока годности до 12 месяцев при температуре хранения до +25°C.

В силу особенностей жирнокислотного состава орехов вопросы сохранения продукции, в частности производимых из них урбечей, и предупреждения активации окислительных процессов, определяемых по кислотному и перекисному числам, являются актуальными.

В настоящее время в пищевой промышленности активно используют нетрадиционные сырьевые ресурсы определенных регионов. Дальнейшее использование ценных пищевых отходов, образовавшихся при первичной переработке сельскохозяйственного сырья, относится к одной из приоритетных задач на государственном уровне в стратегическом развитии отходоёмких отраслей экономики – пищевой и перерабатывающей промышленности.

Для Урало-Сибирского региона в качестве орехового сырья используют орех фундук (*Corylus avellana*) богатый растительным белком (16-17%) и жирами (65-67%), клетчаткой, минералами и витаминами [2]. Ореховое сырье помимо ценного растительного белка содержит жиры. Жирнокислотный состав жира фундука отличается повышенным содержанием ненасыщенных жирных кислот до 81-90% с преобладанием моновенасыщенной олеиновой кислоты – от 70,9 до 88,45%, и полиненасыщенных жирных кислот: линолевой и линоленовой – 6,1-17,4% и 0,1-0,2% соответственно. В тоже время в жире фундука содержатся естественные антиоксиданты: фенольные вещества, токоферолы, каротиноиды, сквален [3, 4]. Содержание витамина E – естественного антиоксиданта, согласно ТР ТС 029/2012 в фундуке составляет 44-45 мг на 100 г, превышая физиологическую потребность человека в 3 раза по нормам, представленным в МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации».

Кедровые орехи – семена сосны кедровой сибирской, или сибирского кедра (*Pinus sibirica*), в которых кедровое масло составляет около 64% от ядра, отличаются уникальным составом: олеиновой жирной кислоты содержится 27,5-30,2%, линолевой – 54,5-57,5%, линоленовой – 0,9-1,3% [5, 6]. Кедровое масло относится к группе линоленовых масел.

Орехи грецкий, пекан, миндаль, фундук, лещина, кешью, макадамия и арахис богаты водо- и жирорастворимыми антиоксидантами, в частности витамином E, которые показывают антирадикальную активность и восстанавливающую силу по методу FRAP (*ferric reducing antioxidant power*) по нейтрализации ионов Fe^{2+} за счет содержания фенолов и флавоноидов. При этом в дикой лещине по сравнению с фундуком содержится фенольных веществ больше в 1,4 раза и флавоноидов в 4,2 раза [7].

В результате исследования антиоксидантных свойств орехов по водорастворимым антиоксидантам (преимущественно фенольным соединениям) установлена следующая зависимость: грецкий орех > фундук > миндаль > кешью; жирорастворимые антиоксиданты в виде фитостеролов и витамина E присутствовали во всех ядрах орехов; все фракции токоферола – только в миндале [8].

Растения обогащают пищевую систему антиоксидантами (фенолы, витамины, каротиноиды, антоцианы, флавоноиды, дубильные вещества, терпеноиды, эфирные масла и др.), обладающими бактерицидными и фунгицидными свойствами. Например, экстракты кедр, сосны, мускатного ореха, шалфея, мяты, корицы и др. используют против штаммов *E. coli*, *S. aureus* и *P. aeruginosa* [9-12].

Ценность антиоксидантов заключается в том, что они регулируют образование свободных радикалов и активных кислородных метаболитов в организме человека, предотвращая окислительный стресс в клетках и их повреждение [13, 14].

Орехи можно отнести к уникальному сырью, содержащему с одной стороны жиры, как окисляемый ингредиент, так и антиоксиданты, замедляющие окисление. В процессе хранения происходит снижение содержания витамина *E* – мощного натурального антиоксиданта, что приводит к окислению моно- и полиненасыщенных жирных кислот с образованием летучих веществ.

Вопросы сохранения ценного орехового сырья определяются условиями хранения. Так, по мнению авторов [6], семена кедрового ореха лучше хранить непосредственно в шишках или в бескислородной среде.

Разработка рецептур урбечей с добавлением дикорастущего сырья, например облепихи, рябины красной и черемухи, распространенных в Уральском регионе, может изменить равновесие в общей пищевой системе в результате обогащения антиоксидантами.

В пищевой промышленности активно используется облепиха и облепиховое масло, богатые ненасыщенными жирными кислотами, фенолами, флавоноидами, катехинами, галлокатехинами [15], а также витаминами *C* и *E*. Добавление облепихового жома в урбечи из фундука приводит к снижению перекисного числа с 4,2 ммоль акт. кисл./кг до 3,6-3,7 ммоль акт. кисл./кг [16]. Экспериментальными данными установлена определенная закономерность: кислотное число в облепиховом масле сначала нарастает в течение определенного времени, а потом наступает химическое равновесие. Накопление перекисей идет на протяжении всего срока хранения, отмечают [17].

Черемуха обыкновенная (кистевая) и рябина обыкновенная красная, распространенные в Предуралье и Уральском регионе, чаще всего используются в фармацевтической промышленности и региональной кухне при производстве мучных кулинарных изделий.

Потенциал черемухи, отличающейся антиоксидантным потенциалом, в настоящее время недооценен. Черемуха отличается вяжущим вкусом и противовоспалительными свойствами за счет содержания дубильных веществ, доля косточки составляет 11,7-13,3%, содержание углеводов составляет от 28,7% до 43,2%, фенольных соединений – от 1,4% до 4,8%, присутствуют антоцианы и витамин *C* [18, 19].

Рябина красная при своей малокалорийности отличается содержанием фенольных соединений и антиоксидантным витаминным составом: аскорбиновая кислота (витамин *C*), бета-каротин и токоферол (витамин *E*) [20], а также витаминами *B₂* (рибофлавин) и *B₆* (пиридоксин) [21].

Вопросы использования различных методов исследования антиоксидантной активности (АОА) носят дискуссионный характер в зависимости от поставленных целей: от исследования каждого отдельного химического вещества или группы веществ, используя разные химические и физико-химические методы, основанные на измерениях потребления кислорода, образования продуктов окисления и поглощения/ связывания свободных радикалов [22, 23]. Эти методы не носят универсальный характер, но позволяют проводить аналитическую оценку комплекса антиоксидантов по АОА.

Собственно содержание антиоксидантов не в полной мере соответствует антиоксидантной активности и полученные разными методами значения антиоксидантной активности не всегда сопоставимы в силу использования разнонаправленных методов на выявление определенных антиоксидантов в количественном измерении; погрешностей оборудования, системы регистрации и обработки результатов; изменчивости количественного и качественного содержания отдельные макро- и микронутриентов и минорных биологически активных веществ, их взаимодействия между собой и др. Можно отметить недостаточную корреляцию по результатам проводимых исследований разными механизмами этих методов,

К известному методу исследования антиоксидантной активности относится метод *FRAP* [4, 8].

Одним из распространенных методов с 2013 года является метод *ORAC*, основанный на измерении липофильных антиоксидантов. В США сформирован банк данных с градацией пищевых продуктов по значению АОА с использованием метода *ORA*: фундук – 9645 $\mu\text{TE}/100\text{ г}$ (по ресвератролу), кедровые орехи – 720 $\mu\text{TE}/100\text{ г}$, облепиха – 4580 $\mu\text{TE}/100\text{ г}$ (по кверцетину), рябина красная – 2360 $\mu\text{TE}/100\text{ г}$.

К универсальному методу относится потенциометрический метод с применением медиаторной системы гексацианоферратов калия ($K_3[Fe(CN)_6]/K_4[F_6(CN)_6]$), который отличается тем, что при доступной процедуре проведения аналитических исследований и низкой трудо- и материалоемкости антиоксидантная активность определяется путем кумуляции по всем химическим веществам антиоксидантной направленности пищевой системы не только для сырья и продуктов растительного происхождения [24, 25], но и для сырья и продуктов животного происхождения [26, 27].

Актуальность проведенных авторами исследований определена тем, что выявление антиоксидантного потенциала урбечей из сырья с определенной антиоксидантной активностью является

важным показателем для оценки безопасности и сроков годности готового продукта. Установлена корреляция антиоксидантной активности (АОА) урбечей из нетрадиционных сырьевых компонентов-дикоросов Урало-Сибирского региона и показателей окислительной порчи урбечей в процессе хранения. Исследования отличаются своей практической ценностью для обоснования сроков хранения урбечей определенной рецептуры, при производстве которых отсутствует термическая обработка.

Методология. Цель работы заключается в исследовании интерферирующего влияния антиоксидантного потенциала сырьевых компонентов урбечей (по АОА) на сроки годности урбечей. Выбор орехового и ягодного сырья в качестве объектов исследования определен региональным произрастанием и использованием сырьевых компонентов в уральской кухне.

Для исследования взят фундук (лещина обыкновенная, *Corylus avellana* L.) высшего сорта (ГОСТ 16835-81), орехи кедровые – семена сосны кедровой сибирской, или сибирского кедра *Pinus sibirica* (ГОСТ 31852-2012), облепиха крушиновидная *Hippophae rhamnoides* L. (ГОСТ Р 59661-2021), черемуха обыкновенная *Padus racemosa* (Lam.) Gilib семейства розоцветных (*Rosaceae*) (ГОСТ 3318-74), рябина обыкновенная (красная) *Sorbus aucuparia* L. семейства розоцветных (*Rosaceae*) (ГОСТ 6714-74).

Для определения антиоксидантной активности ягод отжимали сок с последующим фильтрованием, жом ягод заливали водой комнатной температуры $+(18-19)^{\circ}\text{C}$ в соотношении 2:1, измельченные до состояния крошки орехи заливали водой комнатной температуры $+(18-19)^{\circ}\text{C}$ в соотношении 1:1, после отстаивания орехового молочка сливали жидкую фракцию для последующих исследований.

Антиоксидантную активность (АОА) сырьевых компонентов определяли с использованием анализатора МПА-1 потенциометрическим методом,

основанным на химическом взаимодействии антиоксидантов (без разделения на отдельные антиоксиданты) [28], показатели безопасности: кислотное и перекисное числа – титриметрическим методом по ГОСТ 31933-2012 и ГОСТ 51487-99 на периоде хранения через 30 сут., 60 сут., 90 сут. и 105 сут. хранения с учетом коэффициента резерва согласно МУК 4.2.1847-04. Исследования проводили в пятикратной повторности

Результаты. На первом этапе проводили исследования АОА сырьевых компонентов (рис. 1).

Набольшее значение АОА по ягодам установлено в облепихе $12,49 \pm 0,09$ мМ-экв, по орехам – в фундуке со значением $2,41 \pm 0,01$ мМ-Экв. Полученные значения сопоставимы. АОА в жоме облепихи снизилась на 39,7%, в жоме рябины – на 36,3%, в муке черемухи – на 12,5%. Наибольшее снижение АОА в жоме облепихи наблюдается в связи с тем, что витамин E и флавоноиды в основном содержатся в отжатом соке.

На втором этапе были сформированы образцы урбечей из предварительно измельченного орехового сырья с добавлением высушенного измельченного ягодного сырья в соотношении 3г, 5г и 10г облепихового и рябинового жома и черемуховой муки на 100 г измельченных орехов. Полученная смесь сырьевых компонентов перетиралась в течение 30 мин, затем упаковывалась в стеклянные баночки. Опытным путем было установлено, что добавление ягодного сырья 5 г на 100 г орехового сырья благоприятно сказалось на формировании органолептических показателей: цвет однотонный с оттенком соответствующего ягодного сырья, запах – свойственный виду ореха с легким флейвором соответствующего ягодного сырья, консистенция пластичная, мажущая, вкус сладковатый, свойственный виду ореха с оттенком флейвоара соответствующего ягодного сырья.

На третьем этапе проводили исследование АОА и показателей окислительной порчи (табл. 1).

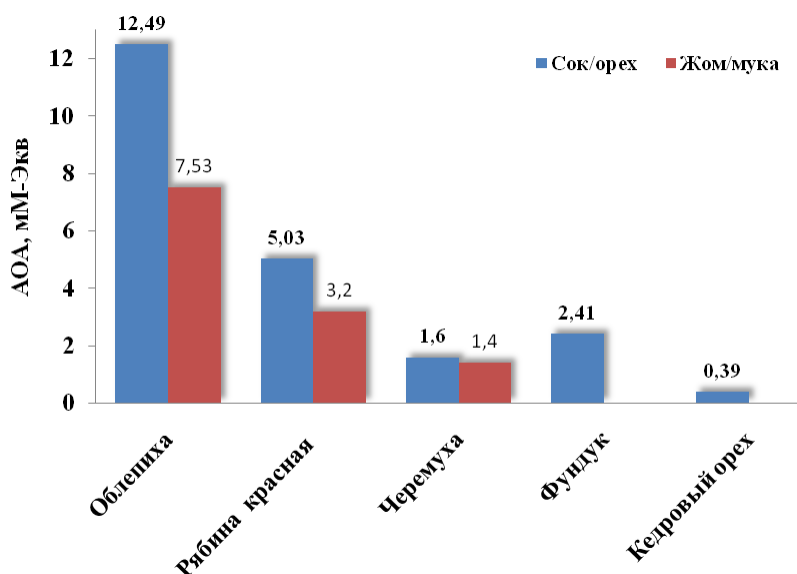


Рисунок 1 – Антиоксидантная активность сырьевых компонентов для производства урбечей, мМ-Экв ($p \leq 0,05$)

Таблица 1 – Зависимость изменения АОА и показателей окислительной порчи в период хранения урбечей до 105 сут ($p \leq 0,05$)

Показатель	ФОЖ	ФРЖ	ФЧМ	КОЖ	КРЖ	КЧМ
АОА, мМ-экв						
30 сут	3,28±0,02	2,79±0,02	2,65±0,02	1,01±0,01	0,84±0,01	0,62±0,01
60 сут	3,18±0,02	2,70±0,02	2,59±0,01	0,98±0,01	0,83±0,01	0,61±0,01
90 сут	3,09±0,02	2,67±0,01	2,60±0,02	0,95±0,01	0,81±0,01	0,61±0,01
105 сут	3,01±0,03	2,65±0,02	2,58±0,02	0,94±0,01	0,81±0,01	0,61±0,01
Кислотное число, мг КОН/г						
30 сут	1,48±0,01	1,49±0,02	1,47±0,02	1,36±0,01	1,35±0,01	1,36±0,01
60 сут	1,58±0,01	1,56±0,02	1,52±0,01	1,39±0,01	1,35±0,01	1,37±0,01
90 сут	1,60±0,01	1,57±0,02	1,52±0,01	1,40±0,01	1,38±0,01	1,38±0,01
105 сут	1,62±0,01	1,58±0,02	1,52±0,01	1,43±0,01	1,39±0,01	1,39±0,02
Перекисное число, ммоль активного кислорода/кг						
30 сут	3,23±0,06	2,51±0,02	2,47±0,02	2,59±0,01	2,47±0,01	2,42±0,02
60 сут	3,35±0,11	2,59±0,04	2,53±0,03	2,63±0,01	2,50±0,01	2,46±0,02
90 сут	3,54±0,09	2,63±0,03	2,55±0,04	2,68±0,01	2,53±0,01	2,49±0,01
105 сут	3,70±0,10	2,75±0,02	2,60±0,02	2,73±0,01	2,57±0,01	2,50±0,01

Примечание. ФОЖ – урбечи из фундука с добавлением облепихового жома, ФРЖ – урбечи из фундука с добавлением рябинового жома, ФЧМ – урбечи из фундука с добавлением черемуховой муки, КОЖ – урбечи из кедровых орехов с добавлением облепихового жома, КРЖ – урбечи из кедровых орехов с добавлением рябинового жома, КЧМ – урбечи из кедровых орехов с добавлением черемуховой муки

По результатам исследований изменения АОА в процессе хранения установлено снижение АОА во всех образцах урбечей. Более интенсивное снижение значения АОА при хранении на периоде с 30 сут. до 105 сут. выявлено в образцах урбечей из фундука с добавлением облепихового и рябинового жома и черемуховой муки на 8,2%, 5,0% и 2,6% соответственно, а также при добавлении облепихового жома в урбечи из фундука на 8,2% и в урбечи из кедрового ореха – на 6,9%.

В процессе хранения наблюдалось увеличение показателей окислительной порчи: содержание кислых компонентов увеличилось в урбечах из фундука на 3,4-9,5% и в урбечах из кедрового ореха – на 2,2-5,1% соответственно при добавлении муки черемуховой, жома из рябины и жома из облепихи; перекисное число увеличилось в образцах урбечей из фундука на 5,2-14,6% и в образцах урбечей из кедрового ореха на 3,3-5,4%.

Обсуждение. Проведенное авторами исследование направлено на обоснование сроков годности урбечей, произведенных из дикоросов Урало-Сибирского региона. При этом использовалось ягодное сырье (облепиха и рябина) после отжима сока, что позволяет осуществлять цикл безотходной технологии от производства сока до производства урбечей.

Технология производства урбечей основана на традиционном подходе – сушка орехового сырья и его измельчение; полученный после отжима сока жом облепихи и красной рябины высушивается и измельчается; мука производится из цельных подсушенных ягод черемухи; затем все ингредиенты перемешиваются. При этом отсутствует термическая обработка.

Антиоксидантная активность сырьевых компонентов для производства урбечей, определенная потенциометрическим способом, сопоставима с антиоксидантной активностью по методу *ORAC*: так АОА выше в фундуке, чем в кедровых орехах. По ягодному сырью (как по соку, так и по жому и муке) выстроен такой ряд: облепиха, красная рябина и черемуха, при этом данных антиоксидантной активности в открытых источниках по черемухе методом *ORAC* отсутствуют. Отличительным моментом является то, что из всех исследуемых сырьевых компонентов наибольшее значение АОА установлено по фундуку, что не нашло подтверждения в наших исследованиях. Для подтверждения или опровержения данного факта авторами были проведены расширенные исследования по фундуку на разных периодах хранения (до 1-го года после сбора урожая).

Исследование АОА потенциометрическим методом отличается нетрудоемким процессом подготовки сырья к исследованию и универсальной методикой исследования антиоксидантной активности, отличающейся повторяемостью с высокой степенью достоверности полученных результатов.

Установлена корреляционная зависимость: при снижении АОА происходит увеличение показателей окислительной порчи в результате снижения естественного антиокислительного потенциала. Полученные результаты показывают наиболее интенсивные изменения по кислотному и перекисному числам в урбечах с добавлением облепихового жома.

На потребительском рынке в настоящее время присутствуют урбечи без указания консервирующего воздействия с обозначенным сроком годности до

12 месяцев, что определяет вектор последующих исследований в существующих условиях нерегламентированных сроков годности урбечей.

Выводы. Разработка урбечей из дикорастущего сырья в Урало-Сибирском регионе расширяет ассортимент традиционных урбечей и позволяет ввести в оборот при производстве урбечей натуральное ореховое сырье, отличающееся содержанием растительного белка и жирнокислотным составом жира, и ягодное сырье в виде отходов (жома, муки) после производства основной продукции, богатое естественными антиоксидантами (витамины С и Е, каротиноиды, фенольные соединения, флавоноиды, дубильные вещества и др.). В результате исследования установлено увеличение АОА свежеприготовленного продукта из фундука в зависимости от добавляемого сырья (облепиховый и рябиновый жом, черемуховая мука) в 1,45 раза, 1,20 раза и 1,15 раза соответственно и увеличение АОА свежеприготовленного урбеча из кедрового ореха – в 2,67 раза, 2,23 раза и 1,67 раза.

Снижение антиоксидантов, как индикаторов происходящих окислительных процессов в процессе хранения, замедляет увеличение кислотного и перекисного чисел и соответственно приводит к снижению АОА. Установлено влияние рецептурного состава на изменение кислотного и перекисного чисел: более резкое снижение происходит в урбечах из фундука, отличающегося повышенным содержанием ненасыщенных жирных кислот, по сравнению с урбечами из кедрового ореха – по кислотному числу на 0,12-0,19 мг КОН/г и по перекисному числу на 0,10-0,97 ммоль активного кислорода/кг, а также в урбечах с добавлением облепихового жома, также отличающегося повышенным содержанием ненасыщенных жирных кислот в отличие от рябинового жома и черемуховой муки. Повышение антиоксидантного потенциала в разработанных урбечах является положительным моментом в расширении ассортимента обогащенных продуктов. Полученные результаты подтверждаются повторяемостью проведенных исследований и сопоставимы с исследованиями других исследователей по сырьевым компонентам.

По данным проведенных исследований обоснован срок годности разработанных урбечей не менее 105 дней. Необходимо продолжение комплексных исследований химического состава урбечей и микробиологических показателей в процессе их хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Акулич А.В., Самуйленко Т.Д., Тимакова Р.Т. Разработка компонентного состава сухих композитных смесей для заварных сортов хлеба улучшенной пищевой ценности // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 4. – С. 158-171. DOI: 10.26107/spfr.2021.240.
2. Левковская Е.В., Рудометкина Е.А. Использование разных видов орехов в технологии мясного хлеба // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития. Материалы всероссийской научно-практической

конференции. Благовещенск: Дальневосточный ГАУ, 2022. – С. 137-143.

3. Cui N., Wang G., Ma Q., Zhao T., Li R., Liang L. Effect of cold-pressed on fatty acid profile, bioactive compounds and oil oxidation of hazelnut during oxidation process / N.Cui, G. Wang, Q. Ma et al. // LWT – Food Science and Technology. 2020. Vol. 129. 109552. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109552.

4. Борисова А.В., Макарова Н.В., Хамтова Э.Х. Сравнительная характеристика фенольных веществ и антиоксидантной активности некоторых видов употребляемых в пищу орехов // Химия растительного сырья. 2022. – № 2. – С. 95-104. DOI: 10.14258/jcrpm.2022029660.

5. Титов Е.В. История выращивания и перспективы плантационного ореховодства кедровых сосен в Восточной Европе // Хвойные бореальные зоны. – 2022. – Т. 40. – № 5. – С. 404-409. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-404-409.

6. Некрасова Ю.О., Мезенова О.Я., Мерзель И.Т., Кюн С. Биопотенциал семян кедровой сосны сибирской и его изменения в процессе хранения // Известия КГТУ. – 2020. – № 56. – С. 119-130. DOI: 10.46845/1997-3071-2020-56-119-130.

7. Борисова А.В., Макарова Н.В., Хамтова Э.Х. Сравнительная характеристика содержания фенольных веществ и антиоксидантной активности некоторых видов употребляемых в пищу орехов // Химия растительного сырья. – 2022. – № 2. – С. 95-104.

8. Нилова Л.П., Малютенкова С.М. Анализ биохимического состава и антиоксидантных свойств орехов, реализуемых на потребительском рынке // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – Т. 82. – № 2(84). – С. 124-130. DOI:10.20914/2310-1202-2020-2-124-130.

9. Favela-Gonzalez K.M., Hernández-Almanza, A.Y., De la Fuente-Salcido, N.M. The value of bioactive compounds of cruciferous vegetables (Brassica) as antimicrobials and antioxidants: A review // Journal of Food Biochemistry. 2020. DOI:10.1111/jfbc.13414.

10. Mc Clements D.J., Das A., Dhar P., Nanda P.K., Chatterjee N. Nanoemulsion-based technologies for delivering natural plant-based antimicrobials in foods // Front/ Sustain. Food Syst. – 2021. – Vol. 5. – DOI: 10.3389/fsufs.2021.643208.

11. Дахова Л.Е., Хомякова И.А., Новиченко О.В., Кутузов М.Н., Егоров М.А., Вилкова Д.Д. Изучение антиоксидантных свойств этанольных и водных экстрактов плодов Solanum Nigrum L // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2024. – № 3. – С. 52-58. DOI: 10.24412/2311-6447-2024-3-52-58

12. Парахина О.И., Савкина О.А., Кузнецова Л.И., Костюченко М.Н., Бурыкина М.С., Фролова Ю.М., Гаврилова Т.А. Перспективы применения сырья растительного происхождения для продления сроков годности хлебобулочных изделий // Хлебопродукты. – 2024. – № 7. – С. 26-35. DOI: 10.32462/0235-2508-2024-33-7-26-35.

13. Okechukwu Q.N. Phytochemical and antioxidant composition of crude water extracts of chlorella vulgaris and its effects on saccharomyces cerevisiae growth in an ethanolic medium // Food Processing: Techniques and Technology. – 2024. – Vol. 54 (2). – P. 289-309. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2509.

14. Канзафарова В.В., Ботева А.А. Отработка методики FRAP для поиска новых антиоксидантов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2024. – № 2. – С. 177-181.

15. Vilas-Franquesa A., Saldo J., Juan B. Potential of sea buckthorn-based ingredients for the food and feed industry – a review // Food Production, Processing and Nutrition. – 2020. – Vol. 2. – P. 2-17. DOI: 10.1186/s43014-020-00032-y

16. Тимакова Р.Т., Корчемкина Е.Ю. Биохимические свойства урбечей нетрадиционной рецептуры с использованием вторичного растительного сырья // Достижения науки и техники АПК. – 2024. – Т. 38. № 5. – С.62-66. DOI: 10.53859/02352451_2024_38_5_62.

17. Болдырева Т.А., Верещагин А.Л., Горемыкина Н.В. Исследование термостабильности облепихового масла // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 3(19). – С. 21-24.

18. Локтева А.В., Кукушкина Т.А. Характеристика качества и химического состава плодов сортов и новых гибридов черемухи // Химия растительного сырья. – 2023. – № 2. – С. 205-213. – DOI: 10.14258/jcrpm.20230211354.

19. Бабухадия К.Р., Бузик И.А., Неустров А.О. Аспекты

использования нетрадиционного сырья в производстве хлебобулочных изделий // Дальневосточный аграрный вестник. – 2023. – Том 17. – № 1. – С. 76-85. – DOI: 10.22450/19996837_2023_1_76.

20. Шелестун А., Елисеева Т. Рябиновый сок: доказанная польза для организма и рекомендации по употреблению // Журнал здорового питания и диетологии. – 2024. – № 27. – С. 14-19. – DOI: 10.59316/j.edpl.2024.27.3

21. Кайзер А.А., Лайшев К.А., Южаков А.А. Биохимический состав ягод и плодов на территории Юго-Западного Таймыра // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – № 29(2). – С.295-302. DOI:10.31242/2618-9712-2024-29-2-295-302.

22. Яшин А.Я., Веденин А.Н., Яшин Я.И., Немзер Б.В. Ягоды: химический состав, антиоксидантная активность, влияние потребления ягод на здоровье человека // Аналитика. – 2019. – Т. 9. – № 3. – С. 222-231. DOI: 10.22184/2227-572X.2019.09.3.222.230.

23. Яшин А.Я. Методология определения антиоксидантной активности пищевых продуктов и биологических жидкостей // Аналитика. – 2021. – Т. 11. – № 5. – С. 370-385. DOI: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384.

24. Тарасов А.В., Заворохина Н.В., Чугунова О.В. Исследование потенциально мешающих веществ при потенциометрическом определении антиоксидантной активности в пищевых системах // Техника и технология пищевых производств. – 2023. – Т. 53. – № 3. – С. 504-512. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-3-2452.

25. Дрегваль А.А. Стожко Н.Ю. Оценка антиоксидантных свойств чайных напитков // Global and Regional Research. – 2024. – Т. 6. – № 4. – С. 133-138.

26. Тимакова Р.Т., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Кудряшов Л.С., Кудряшова О.А., Стожко Н.Ю., Ильяхин Р.В. Влияние ионизирующего излучения на антиоксидантную активность мяса косули // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. – 2017. – Т. 5. – № 2. – С. 25-30. DOI: 10.14529/food170204.

27. Timakova R.T., Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Shikhalov S.V. Determining the dose of radiation and radurisation effects on the antioxidant activity of fish and the thermophysical characteristics of fish muscle tissue // Foods. – 2019. – Vol. 8. – № 4: 8040130. DOI:10.3390/foods8040130.

Статья поступила в редакцию 01.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 663.126

EDN: YLPAFP

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КЛЕТОК НА ПРОДУКТИВНОСТЬ СТАТИЧНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ ДРОЖЖЕЙ (*SACCHAROMYCES CEREVISIAE*) ПО БИОМАССЕ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 4157-4382

AuthorID: 181949

ORCID: 0000-0002-3904-7127

ResearcherID: N-8424-2016

ScopusID: 56216764600

КУЗЬМИН Антон Алексеевич, кандидат биологических наук,
доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: kuzmin-puh@yandex.ru)

Аннотация. Изучено влияние концентрации клеток на продуктивность по биомассе дрожжевых культур при глубинном выращивании в периодическом режиме без перемешивания. Для оценки комплексного влияния факторов роста, дрожжи инкубировали в течение 20 ± 1 ч при температурах 26 или 37°C в средах разной композиции. Полноценный питательный состав включал сахарозу (4%, масс.) и дрожжевой экстракт (0.4%, масс.). Дефицитные среды не содержали один из указанных компонентов. Итоговую продуктивность по биомассе оценивали турбидиметрически по величинам относительного (%) и абсолютного (*FAU*) прироста мутности суспензии. Содержание этанола определяли органолептически. Множественная регрессия, учитывающая все модельные факторы роста, выявила обратно пропорциональную зависимость относительного прироста мутности дрожжевых суспензий, полученных в полноценных по составу средах, от исходной концентрации клеток. Абсолютный прирост мутности (биомассы) безотносительно состава среды не зависит от исходной концентрации клеток в культуре, что связано с ограниченностью жизненного пространства глубоких слоев дрожжевого осадка и преимущественным размножением клеток его поверхностного слоя. Повышенная продуктивность по биомассе при пониженной температуре связана с более интенсивным отводом эндогенного тепла с поверхности метаболически активных клеток. В полноценных питательных средах и относительная, и абсолютная продуктивности дрожжевых культур по биомассе обратно пропорциональны исходной концентрации клеток.

Ключевые слова: дрожжи хлебопекарные, периодическое культивирование, биогенные элементы, нутриенты, питательная среда, турбидиметрия, продуктивность по биомассе, лимитирующие факторы, биотехнология, массообмен, перемешивание, диффузия, конвекция.

EFFECT OF INITIAL CELLS' CONCENTRATION ON THE PRODUCTIVITY OF BAKER'S YEAST BY BIOMASS DURING BATCH CULTIVATION WITHOUT AGITATION

© The Author(s) 2025

KUZMIN Anton Alekseevich, candidate of biological sciences,
associate professor of Biotechnology and Technosphere Safety Department

Penza state technological university

(Russia, 440039, Penza, Pr. Baidukova/Gagarina Street, 1a / 11, e-mail: kuzmin-puh@yandex.ru)

Abstract. The effect of cell concentration on the biomass productivity of yeast cultures during deep cultivation in batch mode without agitation was studied. To evaluate the complex effect of growth factors, yeasts were incubated for 20 ± 1 h at temperatures of 26 or 37°C in media of different composition. The optimal nutrient composition included sucrose (4%, wt.) and yeast extract (0.4%, wt.). The deficient media did not contain one of the mentioned components. Final biomass productivity was estimated turbidimetrically by relative (%) and absolute (*FAU*) increase in suspension turbidity. Ethanol content was determined organoleptically. Multiple regression, taking into account all model growth factors, revealed an inversely proportional dependence of the relative turbidity increase of yeast suspensions obtained in nutrient-rich media on the initial cell concentration. The absolute increase in turbidity (biomass) without regard to the medium composition does not depend on the initial concentration of cells in the culture, which is due to the limited living space of deep layers of yeast sediment and the predominant reproduction of cells of its surface layer. Higher biomass productivity at lower medium temperature is associated with more intensive convection of endogenous heat from the surface of metabolically active cells. In optimal nutrient media, both relative and absolute biomass productivity of yeast cultures are inversely proportional to initial concentration.

Keywords: baker's yeast, batch cultivation, biogenic elements, nutrients, medium, turbidimetry, biomass productivity, factors of limitation, biotechnology, mass transfer, agitation, diffusion, convection.

Для цитирования: Кузьмин А.А. Влияние концентрации клеток на продуктивность статичной периодической культуры дрожжей (*Saccharomyces Cerevisiae*) по биомассе / А.А. Кузьмин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 120-128. – EDN: YLPAFP.

Введение. Продуктивность клеточной культуры зависит от комплекса факторов, которые можно классифицировать по их природе и происхождению или источнику возникновения. По своей природе факторы роста делятся на физические (температура, давление, вязкость, плотность, массообмен, теплообмен, свет) и химические (кислотность среды, концентрации нутриентов). По происхождению условия выращивания можно разделить на внешние (все выше перечисленные) и внутренние, к которым дискуссионно можно отнести собственную исходную концентрацию продуцента в питательной среде. Кроме того, необходимо учитывать способ организации процесса. Периодическое культивирование проходит в закрытой системе, в которой продуцент проходит все стадии роста клеточной культуры, характеризующиеся различным репродуктивным потенциалом. Непрерывный процесс идет в открытой системе, “фиксирующей” продуцента в определенной фазе активности с постоянной скоростью роста и деления.

Биохимические процессы метаболизма идут при участии ферментов, для активности которых справедлива прямо пропорциональная зависимость между количеством молекул энзима и скоростью реакции [1]. Тогда можно предположить, что с ростом исходной концентрации клеток продуцента скорость синтеза первичных метаболитов, а, следовательно, и накопления клеточной биомассы, также будет увеличиваться. Однако, итоговую продуктивность по биомассе культур с различной исходной концентрацией продуцента при прочих равных условиях роста оценить только на основе теории ферментативной кинетики трудно, т.к. в изолированной периодической культуре в силу вступают различные лимитирующие факторы: исчерпание субстрата, образование ингибирующих рост и деление клеток продуктов, ограниченность жизненного пространства (особенно при отсутствии перемешивания культуральной жидкости), а сама культура проходит все стадии развития, обладающие различным ассимиляционным потенциалом.

Цель работы – оценить влияние концентрации клеток продуцента на продуктивность хлебопекарных

дрожжей по биомассе при периодическом культивировании без перемешивания.

Методология. Для объективной оценки влияния исходной концентрации дрожжевых клеток на итоговую продуктивность культуры по биомассе необходимо учитывать множество факторов роста, их взаимодействие друг с другом и комплексный эффект на метаболическую активность продуцента. В работе предпринята попытка выявить зависимость итоговой продуктивности дрожжей от ряда параметров роста, одновременно действующих в культуре, включая исходные концентрации клеток, состав питательной среды, температуру, наличие вторичных метаболитов (этанол).

Материалом работы послужили данные по накоплению клеточной биомассы в культурах дрожжей, полученных методом глубинного выращивания в периодическом режиме. Маточную культуру продуцента готовили из брикета прессованных хлебопекарных дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*, G.Winter, 1880), влажность 75-80%, непосредственно перед культивированием из расчета 10 г прессованной массы на 100 мл воды. Модельные питательные среды получали в день закладки эксперимента растворением навески химически чистого вещества в стерильной дистиллированной воде объемом 50 мл. Культивирование проводили в плоскодонных термостойких колбах объемом 250 мл, снабженных ватно-марлевыми пробками. Посуду и реактивы предварительно стерилизовали в автоклаве в течение 45±2 мин при температуре 120°C и давлении 1,1 атм. Концентрацию клеточной массы оценивали турбидиметрически путем измерения мутности суспензии в единицах FAU [2].

Различные по концентрации продуцента культуры дрожжей получали разведением исходной суспензии объемом от 0,5 до 3 мл с шагом 0,5 мл в 50 мл свежеприготовленной питательной среды. Верхний порог концентрации дрожжевых культур установлен в предварительных экспериментах и ограничен пределом обнаружения мутномера (1100 FAU). Этапы расчета исходных концентраций продуцента в модельных культурах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет исходных концентраций дрожжей в модельных культурах

Масса навески прессованных дрожжей, г	Влажность брикета прессованных дрожжей, %	Масса дрожжей в навеске, г	Объем исходной суспензии, мл	Концентрация дрожжей в исходной суспензии, мг/мл	Объем исходной суспензии для приготовления модельной культуры, мл	Объем модельной культуры, мл	Концентрация дрожжей в модельной культуре, мг/мл
10	75	2,5	100	25	0,5	50	0,25
10	75	2,5	100	25	1	50	0,5
10	75	2,5	100	25	1,5	50	0,75
10	75	2,5	100	25	2	50	1
10	75	2,5	100	25	2,5	50	1,25
10	75	2,5	100	25	3	50	1,5

Значения концентрации клеток в ед/мл рассчитывали на основании результатов предварительной калибровки разведений стандартных клеточных суспензий. Количество клеток в мл культуры подсчитывали микроскопически с помощью камеры Горяева по формуле [3]:

$$N = n/4 \cdot 10^6 \quad (1)$$

где N – концентрация клеток в суспензии, ед/мл;

n – число клеток над большим квадратом сетки камеры, ед.

Для проверки влияния состава среды на прирост биомассы дрожжи выращивали в питательных растворах двух типов:

1) полноценный субстрат содержал как источник органического углерода (сахароза, 4% масс.), так и источник аминного азота (экстракт дрожжевой, 0.4% масс.);

2) дефицитный субстрат содержал только один из источников биогенных элементов оптимальной по составу нутриентов питательной среды – либо сахар, либо дрожжевой экстракт (в тех же концентрациях).

Дрожжевые культуры инкубировали в течение 20 ± 1 ч в термостатах, поддерживающих мезофильные (37°C) или психрофильные (26°C) условия.

Продуктивность культуры по этанолу оценивали органолептически по шкале от 0 до 2, где 0 – полное отсутствие запаха спирта, 1 – различимый запах спирта, 2 – резкий запах.

Выращивание осуществляли без перемешивания. С одной стороны отсутствие массообмена снижает полноту усвоения питательных веществ среды, а, следовательно, ассимиляционный потенциал продуцента, с другой – такой способ культивирования позволяет косвенно оценить влияние лимитирующего фактора ограниченности жизненного пространства на рост колонии клеток. Поэтому итоговый прирост клеточной массы оценивали турбидиметрически (в единицах мутности FAU) двумя способами: (1) относительно мутности исходной культуры клеток (сразу после приготовления и интенсивного взмучивания) и (2) как абсолютный прирост мутности культуры (для проверки предположения о снижении репродуктивного потенциала клеток в нижних слоях дрожжевого осадка ввиду ограниченности жизненного пространства).

Для сравнения средних значений в выборках применяли t -критерий Стьюдента [4].

Для сравнения выборок, не подчиняющихся нормальному распределению величин, применяли непараметрические тесты ранговых корреляций Уилкоксона (U) и Краскала-Уоллиса (H) [5, 6]. Проверку распределения значений в выборке на нормальность выполняли с помощью теста Шапиро-Уилка (W) [7].

Современные методы статистического анализа позволяют оценить комплексное влияние различных факторов, одновременно действующих на систему, определить характер отношений между факторами и выявить наиболее значимые из них.

Коэффициенты зависимости между параметрами роста вычисляли путем построения линейной модели множественной регрессии [8, 9]. Прогностические возможности регрессионных моделей оценивали по поведению остатков (абсолютных разностей между наблюдаемыми и предсказанными значениями зависимой переменной) методом построения диагностических графиков [10-15].

Порог статистической значимости (p) во всех применяемых тестах принимали равным 0.05. Количество однотипных объектов указывается в скобках ($n = \dots$) после их упоминания в тексте.

Структурирование исходных данных проводили в табличном редакторе *Microsoft Excel* [16]. Статистические тесты, графическое представление результатов анализа выполняли с помощью языка программирования *R* в среде *RStudio* [17, 18].

Снижение репродуктивного потенциала клеток в культуре без перемешивания можно объяснить следующими причинами. Во-первых, диффузия растворенных в среде питательных веществ эффективна только на коротких расстояниях и прямо пропорциональна площади поверхности, через которую движутся частицы. Массообмен, т.е. различные виды перемешивания, обеспечивает оба эти условия, постоянно обновляя питательный раствор на поверхности соприкасающихся с ним клеток. Во-вторых, медленно диффундирующие в статичной, относительно вязкой жидкой среде питательные вещества будут поглощаться, главным образом, поверхностным слоем клеточного осадка. В-третьих, локальный недостаток пространства у клеток глубинных слоев осадка затрудняет как рост родительской клетки, так и формирование почек отпрысков.

Если вышеуказанные причины справедливы, то абсолютный прирост мутности (биомассы) культуры не будет зависеть от исходной концентрации клеток продуцента, а определяться, главным образом, площадью межфазной поверхности “осевшие дрожжи – питательный раствор” или оставаться постоянным, т.к. расти и размножаться будут только клетки поверхностных слоев осадка. Если гипотеза ошибочна, и репродуктивный потенциал клеток не зависит от наличия свободного жизненного пространства, то должна наблюдаться статистически значимая корреляция между исходным содержанием клеток в культуре и абсолютным приростом биомассы за время выращивания.

Результаты. Регрессионная модель данных калибровки выявила статистически значимую ($n = 24$, $F = 933.8$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$) прямо пропорциональную ($k = 1.52$, $p < 2.2 \times 10^{-16}$) зависимость мутности дрожжевых суспензий (FAU) от количества клеток в большом квадрате сетки камеры Горяева (рис. 1). Модель объясняет 97.49% дисперсии зависимой переменной. Общее уравнение регрессии: $y = 1.52x$. После расчета значений концентраций клеточных суспензий по формуле (1) получена итоговая зависимость: $FAU =$

$6.08 \times N$, которая позволяет вычислить концентрации клеток в культурах по величинам их мутности.

Графическая диагностика остатков модели (рис. 2) позволяет считать модель удовлетворительной в предсказании значений зависимой переменной.

Распределение в выборках значений исходной ($n = 32$, $W = 0.94006$, $p = 0.07518$) и итоговой ($n = 32$, $W = 0.97579$, $p = 0.6714$) концентраций клеток в культурах не отличается от нормального. Сравнительный тест средних значений выборок исходной и итоговой концентраций клеток в суспензиях выявил статистически значимые различия между ними (парный тест Стьюдента: $t = -9.7404$, $df = 31$, $p = 5.983 \times 10^{-11}$). Следовательно, по-добранные условия культивирования обеспечивают рост и размножение дрожжей в культурах. Диаграммы разброса значений концентраций (ед/мл) в выборках представлены на рисунке 3.

Модель линейной регрессии выявила статистически значимую обратно пропорциональную корреляцию между исходной концентрацией клеток в культурах и их относительным приростом по биомассе (коэффициент регрессии $k = -1.8841$, $p = 4.10 \times 10^{-5}$; $R^2 = 0.4155$, $F = 23.03$, $p = 4.104 \times 10^{-5}$; общее уравнение регрессии: $y = -1.8841x + 185.1041$, рис. 4А). Коэффициенты регрессионной модели, построенной для зависимости “абсолютный прирост – исходная концентрация дрожжей” не являются статистически значимыми ($k = -0.3713$, $p = 0.06193$; $R^2 = 0.08177$, $F = 3.76$, $p = 0.06193$; общее уравнение регрессии: $y = -0.3713x + 58.5868$, рис. 4Б).

Таким образом, с ростом концентрации относительный прирост клеточной массы пропорционально снижается, а абсолютный прирост не зависит от исходного содержания клеток в дрожжевых культурах.

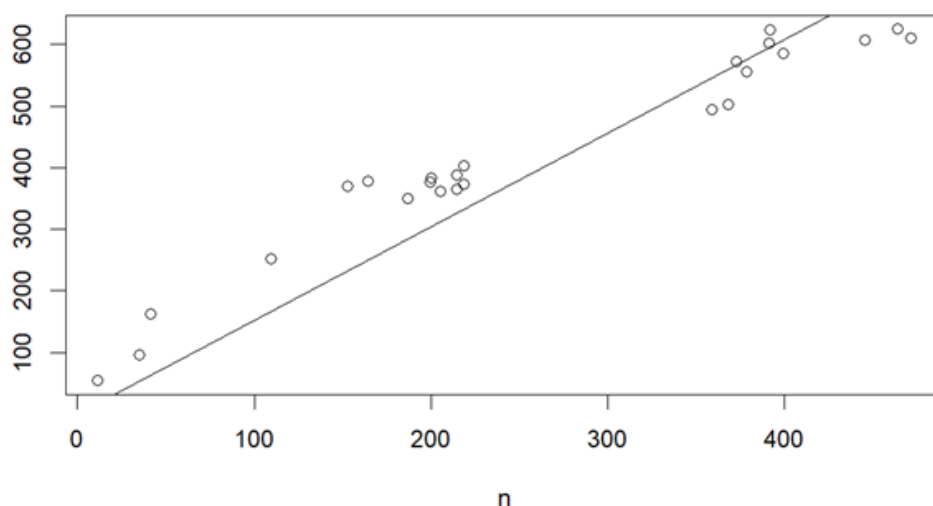


Рисунок 1 – Калибровочный график для определения концентраций клеток в дрожжевых суспензиях по величине их мутности (FAU)

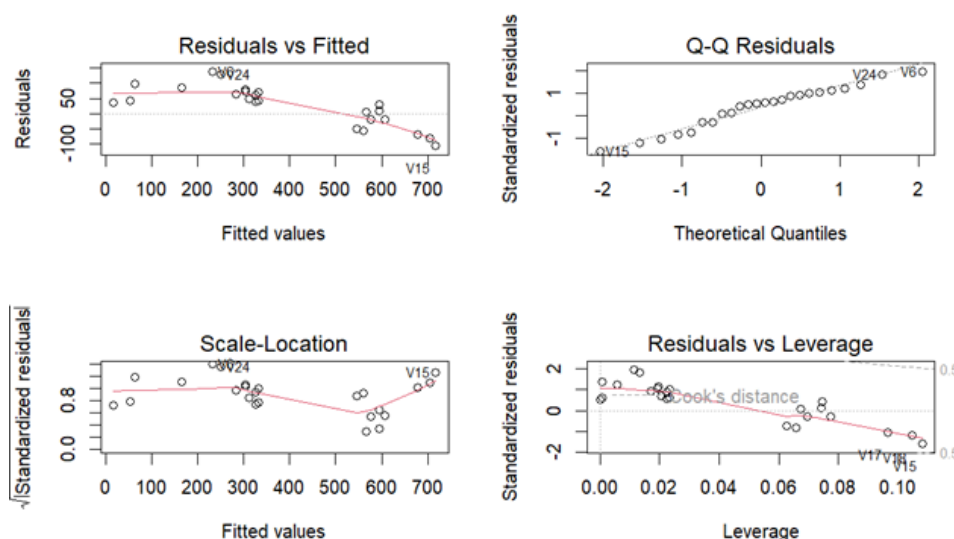


Рисунок 2 – Диагностические графики проверки остатков калибровочной модели “концентрация клеток - мутность суспензии”

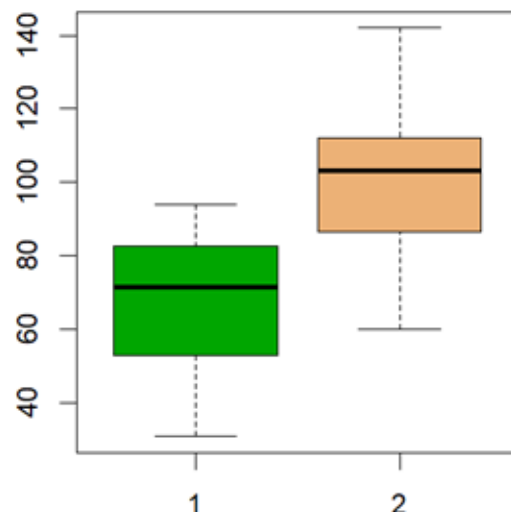


Рисунок 3 – Диаграммы разброса значений исходной (1) и итоговой (2) концентраций клеток (ед/мл) в культурах дрожжей

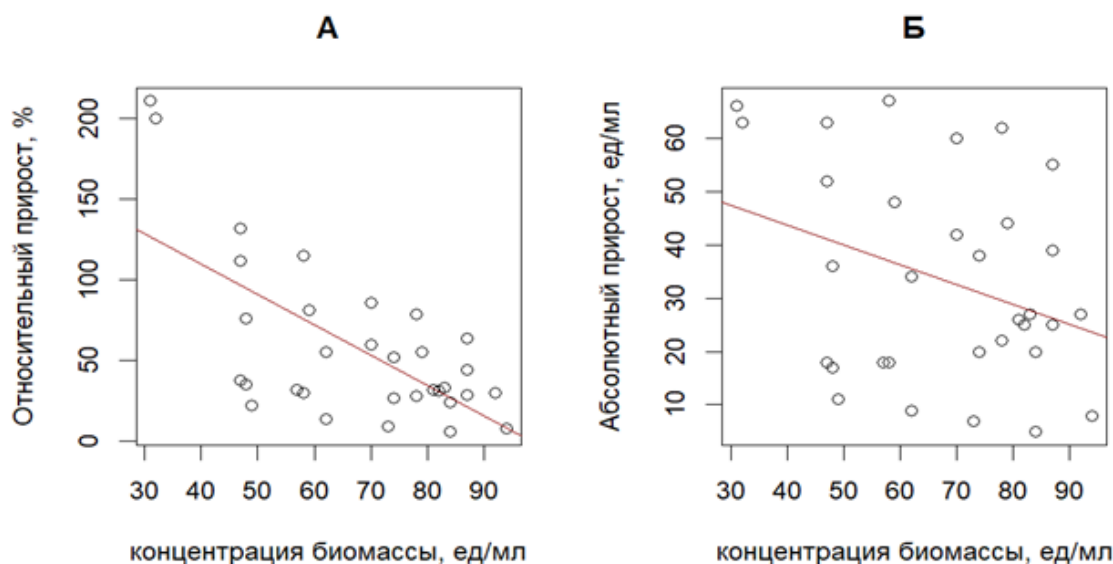


Рисунок 4 – Точечные диаграммы значений относительного (А) и абсолютного (Б) прироста дрожжевых культур по биомассе в зависимости от исходной концентрации клеток продуцента (линии построены по уравнениям регрессионных моделей)

Модель множественной регрессии, учитывающая одновременное влияние различных факторов роста (исходная концентрация клеток, состав питательной среды, температура, образование вторичных метаболитов) на итоговую относительную (%) продуктивность дрожжевых культур по биомассе, выявила статистически значимые коэффициенты регрессии ($F=16.75$, $p=2.069 \times 10^{-7}$). Модель объясняет 71.75% дисперсии значений зависимой переменной, что превышает этот показатель однофакторной модели линейной регрессии “относительный прирост – исходная концентрация клеток” (41.55). Итоговое относительное накопление числа клеток обратно пропорционально их исходной концентрации ($k=-1.4507$, $p=2.77 \times 10^{-5}$), а также достоверно выше при росте продуцента в полноценной по составу среде ($k=60.8456$, $p=9.78 \times 10^{-5}$). Температура культивирования, дефицитные питательные среды

и концентрация этанола в среде не являются статистически значимыми предиктами модели. На рисунке 5 представлены диагностические графики, которые позволяют оценить прогностические возможности построенной модели предсказывать значения зависимой переменной. Для этого проведен графический анализ поведения остатков величин относительного прироста клеточной массы.

В построенной модели зависимость остатков от предсказанных значений параболически отклоняется от линии горизонта (рис. 5,верху, слева), совокупность значений остатков подчиняется нормальному распределению (рис. 5,верху, справа), дисперсия величин остатков постоянна (гомоскедастична) и равномерна относительно диапазонов значений независимых переменных (рис. 5,внизу, слева), выбросы, несмотря на их наличие (см. точки 1, 7 и 23) не оказывают существенного влияния на

коэффициенты регрессии, т.к. находятся в пределах дистанции Кука (рис. 5, внизу, справа). В целом, модель удовлетворительно предсказывает значения зависимой переменной.

Модель множественной регрессии, учитывающая одновременное влияние различных факторов роста на итоговый абсолютный прирост числа клеток в дрожжевых культурах, также обнаружила статистически значимые коэффициенты регрессии ($F = 18.91$, $p = 6.329 \times 10^{-8}$). Модель объясняет 74.28% дисперсии значений зависимой переменной, тогда как однофакторная модель линейной регрессии оказалась неэффективной в выявлении корреляции между абсолютным приростом биомассы и ее исходной

концентрацией в культурах. Итоговый абсолютный прирост клеточной массы статистически значимо выше в полноценных по составу питательных средах ($k = 35.2832$, $p = 1.27 \times 10^{-7}$) и не зависит от исходной концентрации продуцента ($k = -0.1249$, $p = 0.2501$). Температура культивирования, дефицитные питательные среды и концентрация этанола в среде не являются статистически значимыми предиктами модели. На рисунке 6 представлены диагностические графики, которые позволяют оценить прогностические возможности построенной модели предсказывать значения зависимой переменной. Для этого проведен графический анализ поведения остатков величин абсолютного прироста клеточной массы.

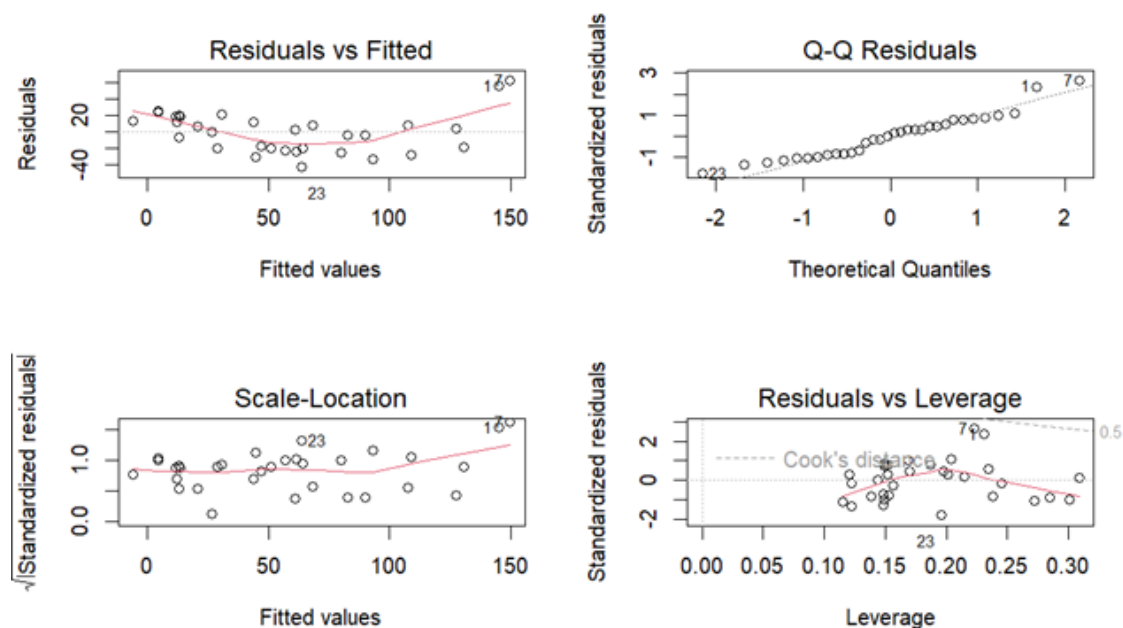


Рисунок 5 – Графики проверки остатков величин итогового относительного прироста клеточной массы (%) культур дрожжей в модели множественной регрессии

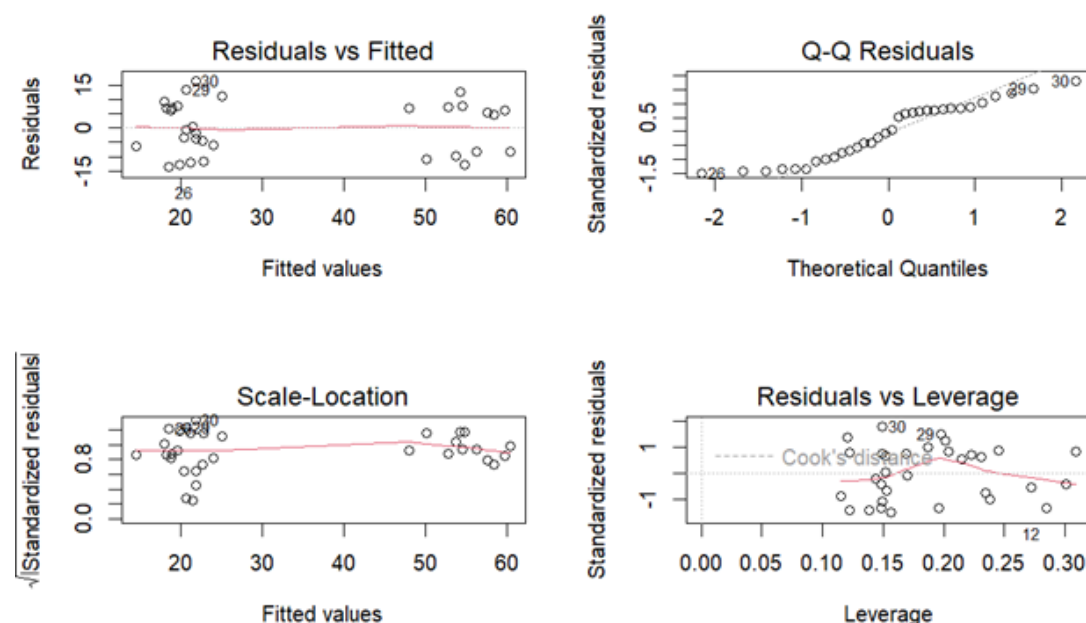


Рисунок 6 – Графики проверки остатков величин итогового абсолютного прироста клеток, ед/мл, в дрожжевых культурах в модели множественной регрессии

В построенной модели зависимость остатков от предсказанных совпадает с линией горизонта (рис. 6, сверху, слева), совокупность значений остатков подчиняется нормальному распределению (рис. 6, сверху, справа), дисперсия величин остатков постоянна (гомоскедастична), но не равномерна относительно диапазонов значений независимых переменных (рис. 6, внизу, слева), выбросы, несмотря на их наличие (см. точки 26, 29 и 30), не оказывают существенного влияния на коэффициенты регрессии, т.к. находятся в пределах дистанции Кука (рис. 6, внизу, справа). Прогностические возможности модели можно считать удовлетворительными.

В обеих моделях множественной регрессии статистически значимым предиктом является полноценный по составу нутриентов питательный субстрат. Анализ зависимости продуктивности дрожжей по биомассе от исходной концентрации

клеточных культур и других факторов роста в полноценной питательной среде ($n = 12$) показал, что относительный прирост клеточной массы обратно пропорционален исходной концентрации клеток ($k = -2.8070, p = 1.56 \times 10^{-5}$), не зависит от температуры ($k = -1.9120, p = 0.0773$) и содержания этанола в среде ($k = 15.9963, p = 0.1148$); модель (рис. 7) объясняет 89.33 % дисперсии значений зависимой переменной и является статистически значимой ($F = 31.71, p = 8.63 \times 10^{-5}$).

Аналогичная модель (рис. 8) для абсолютного прироста числа клеток в культурах ($n = 12$), будучи также достоверной ($F = 11.51, p = 0.002842$), объясняя 74.13% дисперсии значений зависимой переменной, обнаружила обратно пропорциональную зависимость последней от исходной концентрации клеток ($k = -0.2735, p = 0.01294$) и температуры инкубации ($k = -1.18, p = 0.00218$).

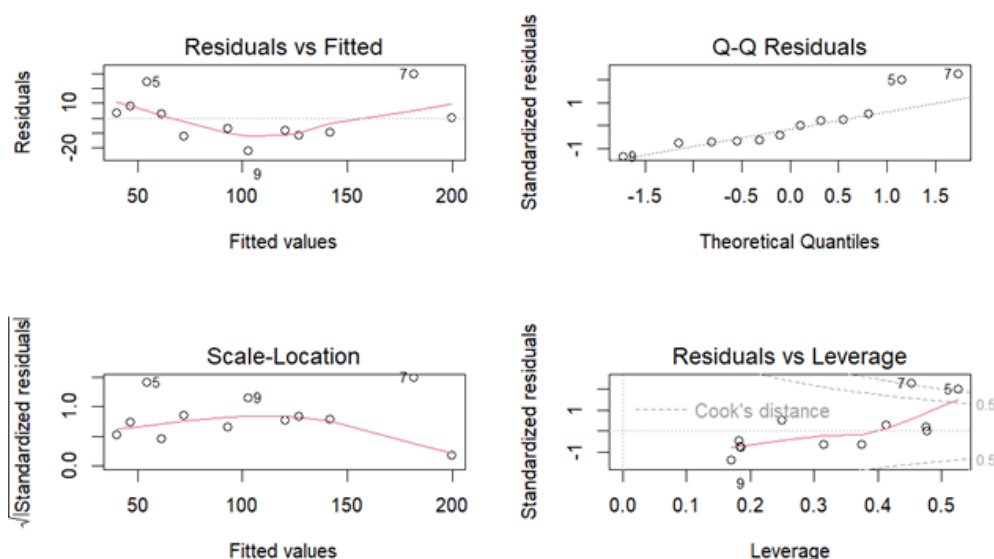


Рисунок 7 – Графики проверки остатков величин итогового относительного прироста клеточной массы (%) культур дрожжей, выращенных на полноценном субстрате, в модели множественной регрессии

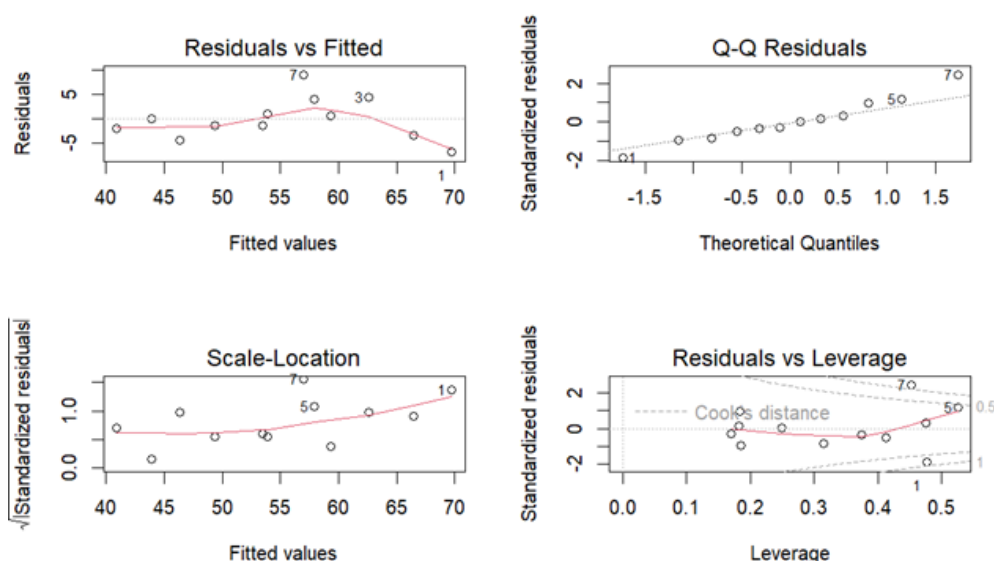


Рисунок 8 – Графики диагностики остатков величин итогового абсолютного прироста клеточной массы дрожжевых культур, выращенных на полноценном субстрате, в модели множественной регрессии

Прогностический потенциал обеих моделей ограничивают отклоняющиеся от прямолинейного горизонтального паттерны остатков от предсказанных значений зависимой переменной (рис. 7, 8, сверху, слева) и наличие выбросов, превышающих дистанцию Кука (рис. 7, 8, внизу, справа)

Обсуждение. Дрожжи являются модельным объектом биотехнологических исследований. Условия их выращивания напрямую влияют на их продуктивность по биомассе. Влияние различных факторов на рост дрожжей изучено во многих классических работах. Установлены, в частности, трофические предпочтения дрожжей в источниках биогенных элементов [19, 20]. Выявлены оптимальные для роста и деления клеток температурные интервалы [21, 22]. Установлен интервал значений pH , обеспечивающий оптимальный прирост клеточной массы [23]. Проведено сравнение продуктивностей периодической, подпиточной и непрерывных дрожжевых культур [24]. Дана количественная оценка эффекта перемешивания на рост продуцента [25].

Однако, указанные факторы действуют в культуре не изолированно, а одновременно. Оценке комплексного влияния факторов среды на рост продуцента, по нашему мнению, уделено недостаточно внимания.

Дрожжевая клетка, будучи целостным организмом, обменивается веществами с окружающей средой через цитоплазматическую мембрану, регулирующую транспорт соединений по принципу избирательной проницаемости. Интенсивное поглощение клеткой питательных субстратов во многом зависит от величины градиента концентрации нутриентов между цитоплазмой и окружающей средой. Крутизну этого градиента можно поддерживать двумя путями. Первый подход должен обеспечивать активное потребление питательного вещества клеткой. Второй – поддерживать высокую концентрацию субстрата в окружающей среде.

Первый путь подразумевает создание и поддержание оптимальных физико-химических условий, обеспечивающих максимальную скорость синтеза продуцентом первичных метаболитов (основных компонентов биомассы), интенсивный расход субстратов роста и активное поглощение клеткой питательных веществ извне.

Второй подход легко реализовать в открытой системе непрерывного культивирования или культивировании с подпиткой субстрата, когда свежий питательный раствор постепенно вводится в ферментационную жидкость. Второй путь в условиях изолированной системы периодического культивирования может быть реализован только за счет эффективного массообмена в культуральной жидкости, то есть механического или воздушного (барботажа) перемешивания, обеспечивающего постоянное обновление среды, контактирующей с поверхностью клетки продуцента.

Принудительное перемешивание жидкой среды

повышает скорость двух типов транспорта: диффузии веществ на короткие расстояния, в частности, через клеточную мембрану, и конвекции – массопереноса нутриентов на относительно дальние расстояния, способствующего постоянному обновлению среды у поверхности клеточных мембран, а, следовательно, обеспечивающего крутизну концентрационного градиента. Кроме того, массообмен переводит оседающие в суспензии клетки во взвешенное состояние, снижая эффект ограниченности жизненного пространства, возникающий у клеток нижних слоев осадка. В этой связи статичное культивирование можно рассматривать как лимитированное по массообмену, поэтому перспективным направлением развития исследований будет сравнение продуктивности культур статичных и с перемешиванием.

Снижение абсолютного прироста продуцента в градиенте его исходной концентрации, вероятно, вызвано повышающимся дефицитом нутриентов вблизи активно ассимилирующих клеток, усиливающимся в отсутствии перемешивания.

В среде, сбалансированной по составу нутриентов, метаболическая активность продуцента высока и сопровождается излучением эндогенного тепла в окружающую среду. Чем выше температура среды, тем ниже скорость отведения (конвекции) тепла с поверхности клеток. В отсутствии перемешивания процесс теплоотведения еще более затруднен. В итоге избыточное тепло, скапливаясь у поверхности клеток, снижает интенсивность обменных процессов в них и, как следствие, рост культуры.

Выводы. Подобранные параметры культивирования обеспечивают статистически значимый рост и размножение дрожжей в культурах. Следовательно, исходная концентрация клеток, состав питательного субстрата, температура являются необходимыми условиями выращивания хлебопекарных дрожжей.

Однофакторные регрессионные модели выявили уменьшение относительного прироста числа клеток в градиенте их исходной концентрации (ед/мл).

Множественная регрессия, учитывающая все модельные факторы роста, выявила обратно пропорциональную зависимость относительного прироста числа клеток в культурах, полученных в полноценных по составу нутриентов средах, от начальной концентрации биомассы продуцента.

Абсолютный прирост клеточной концентрации безотносительно состава среды не зависит от исходной концентрации клеток в культуре, что связано с ограниченностью жизненного пространства глубоких слоев дрожжевого осадка и преимущественным размножением клеток его поверхностного слоя.

В полноценных питательных средах и относительная, и абсолютная продуктивности дрожжевых культур по биомассе обратно пропорциональны исходной концентрации клеток. В условиях отсутствия перемешивания и высокой метаболической активности клеток с ростом их начального числа нарастает локальный дефицит питательных веществ,

приводящий к закономерному снижению репродуктивного потенциала дрожжевой культуры.

Повышенная продуктивность по биомассе при более низкой температуре среды связана с более интенсивным отводом эндогенного тепла с поверхности метаболически активных клеток.

Лимитированные по источникам биогенных элементов субстраты снижают репродуктивный потенциал продуцента независимо от начальной концентрации его клеток.

В работе предпринята попытка оценить комплексное действие факторов роста на репродуктивный потенциал дрожжей. Выявлены наиболее и наименее значимые параметры. Подтверждена гипотеза лимитирующей рост продуцента ограниченности жизненного пространства нижних слоев клеточного осадка в культуре без перемешивания. Представлены возможные причины обнаруженных зависимостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Michaelis L., Menten M.L. (1913). Die kinetik der invertinwirkung // *Biochem. z.* T. 49. №. 333-369. С. 352.
2. Mary C. Haven; Gregory A. Tetrault; Jerald R. Schenken (1994). *Laboratory Instrumentation*. John Wiley and Sons. ISBN 0471285722.
3. Горяев Н.К. (1928). Исследования и симптоматология болезней крови, в кн.: Основы клин. диагностики, под ред. А.М. Левина и Д.Д. Плетнёва, М. – Л., 713 с.
4. Student. (1908). The probable error of a mean. // *Biometrika*. № 6 (1). P. 1-25.
5. Myles Hollander & Douglas A. Wolfe (1973). *Nonparametric Statistical Methods*. New York: John Wiley & Sons.
6. David F. Bauer (1972). Constructing confidence sets using rank statistics. *Journal of the American Statistical Association* 67, 687-690. doi:10.1080/01621459.1972.10481279.
7. Patrick Royston (1982). An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples. *Applied Statistics*, 31, 115-124. doi:10.2307/2347973.
8. Chambers, J.M. (1992) Linear models. Chapter 4 of *Statistical Models in S* eds J.M. Chambers and T.J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole.
9. Wilkinson, G.N. and Rogers, C.E. (1973). Symbolic descriptions of factorial models for analysis of variance. *Applied Statistics*, 22, 392-399. doi:10.2307/2346786.
10. Belsley, D.A., Kuh, E. and Welsch, R.E. (1980). *Regression Diagnostics*. New York: Wiley.
11. Cook, R.D. and Weisberg, S. (1982). *Residuals and Influence in Regression*. London: Chapman and Hall.
12. Firth, D. (1991) Generalized Linear Models. In Hinkley, D. V. and Reid, N. and Snell, E. J., eds: Pp. 55-82 in *Statistical Theory and Modelling*. In Honour of Sir David Cox, FRS. London: Chapman and Hall.
13. Hinkley, D.V. (1975). On power transformations to symmetry. *Biometrika*, 62, 101-111. doi:10.2307/2334491.
14. McCullagh, P. and Nelder, J.A. (1989). *Generalized Linear Models*. London: Chapman and Hall.
15. Dunn, P.K. and Smyth G.K. (2018) *Generalized Linear Models with Examples in R*. New York: Springer-Verlag.
16. Microsoft Corporation, 2018. Microsoft Excel, Available at: <https://office.microsoft.com/excel>.
17. R Core Team (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
18. RStudio Team (2024). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com>.
19. Barford, J.P., Johnston, J.H., and Mwesigye, P.K., (1995). Continuous culture study of transient behaviour of *Saccharomyces cerevisiae* growing on sucrose and fructose. *J. Ferment. Bioeng.*, 79, 158-162.
20. Albers E, Larsson C, Lidén G, Niklasson C, Gustafsson L. (1996). Influence of the nitrogen source on *Saccharomyces cerevisiae* anaerobic growth and product formation. *Appl Environ Microbiol.* Sep;62(9):3187-95. doi: 10.1128/aem.62.9.3187-3195.1996. PMID: 8795209; PMCID: PMC168115.
21. Richards, O.W. (1928). The Growth of the Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. I. The Growth Curve, its Mathematical Analysis, and the Effect of Temperature on the Yeast Growth. *Annals of Botany*, 42(165), 271-283. <http://www.jstor.org/stable/43237105>.
22. Walsh, R.M. and Martin, P.A. (1977), growth of *Saccharomyces cerevisiae* and *Saccharomyces uvarum* in a temperature gradient incubator. *Journal of the Institute of Brewing*, 83: 169-172. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1977.tb06813.x>.
23. Narendranath NV, Power R. (2005). Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of lactobacilli and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production. *Appl Environ Microbiol.* May;71(5):2239-43. doi: 10.1128/AEM.71.5.2239-2243.2005. PMID: 15870306; PMCID: PMC1087585.
24. Copella, S.J. and Dhurjati, P., (1989). A detailed analysis of *Saccharomyces cerevisiae* growth kinetics in batch, fed-batch and hollow-fibre bioreactors. *Chem. Eng. J.*, 41, B27-B35.
25. Rice, J.F., Helbert, J.R., & Garver, J.C. (1974). The Quantitative Influence of Agitation on Yeast Growth during Fermentation. *Proceedings. Annual Meeting - American Society of Brewing Chemists*, 32(2), 94-96. <https://doi.org/10.1080/00960845.1974.12033745>.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 614.844.2, 519.217.2

EDN: DIWEEW

**ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА**

© Авторы 2025

SPIN: 5721-1570

Author ID: 181476

ORCID: 0000-0002-2769-0086

Researcher ID: E-2182-2018

ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Высшей школы техносферной безопасности
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29)

SPIN: 1076-8133 Author ID: 664653

ORCID: 0000-0003-1561-2483

Researcher ID: K-2087-2018

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор,
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),

ORCID 0000-0002-1616-3504

Researcher ID: GQH-8479-2022

SCOPUS ID: 57212561809

Author ID: 980446

БАЛАБАНОВ Иван Дмитриевич, аспирант

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29)

Author ID: 1081538

АЛЕШКОВ Александр Михайлович, кандидат технических наук,
доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве
Московский государственный строительный университет
(129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26)

ORCID 0000-0002-1616-3504

Researcher ID: GQH-8479-2022

SCOPUS ID: 57212561809

Author ID: 980446

БОНДАР Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент,
директор Департамента образовательной и научно-технической деятельности
МЧС России
(121357, г. Москва, ул. Ватутина, д.1)

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с применением цепей Маркова к оценке вероятностей ситуаций, связанных с пожарами на объектах, имеющих противопожарную защиту. На примерах объектов с обратимыми состояниями, таких как пожар, на автостоянке, и необратимыми состояниями, например, пожар на складе с продукцией, показана возможность определения вероятностей их состояний с использованием цепей Маркова, как с дискретным, так и с непрерывным временем. Приведено универсальное выражение для оценки установившихся вероятностей состояний. Особое внимание уделено определению вероятностей необратимых состояний. Изложенные материалы проиллюстрированы количественными оценками вероятностей состояний, что способствует лучшему пониманию динамики возникновения и развития пожара. Сделан вывод о целесообразности дальнейших исследований в части применения цепей Маркова к моделированию работы дежурно-диспетчерских пунктов, что может значительно улучшить эффективность реагирования на чрезвычайные ситуации и обеспечить более безопасную эксплуатацию объектов с высокой степенью риска.

Ключевые слова: пожар, системы противопожарной защиты, моделирование, цепи Маркова, матрица переходов, вероятности состояний.

APPLIED ISSUES OF MODELING FIRE PROTECTION SYSTEMS USING MARKOV CHAINS

© Authors 2025

TANKLEVSKY Leonid Timofeevich, doctor of technical sciences, professor,
head of Department of Higher School of Technosphere Safety
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya str., 29)

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),

BALABANOV Ivan Dmitrievich, postgraduate student
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(195251, Russia, Saint Petersburg, Politekhnikeskaya str., 29)

ALESHKOV Alexander Mikhailovich, phd, associate professor
of the Department of Integrated Safety in Construction

Moscow State University of Civil Engineering

(129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoye highway, 26)

BONDAR Alexander Ivanovich, candidate of technical sciences, associate professor,
director of the Department of Educational, Scientific and Technical Activities

Ministry of Emergency Situations of Russia

(121357, Russia, Moscow, Vatutina str., 1)

Abstract. The issues related to the application of Markov chains to the assessment of the probabilities of situations related to fires at facilities with fire protection are considered. Examples of objects with reversible states, such as a fire in a parking lot, and irreversible states, such as a fire in a warehouse with products, show the possibility of determining the probabilities of their states using Markov chains, both with discrete and continuous time. A universal expression for estimating steady-state probabilities is given. Special attention is paid to determining the probabilities of irreversible states. The presented materials are illustrated by quantitative estimates of the probabilities of conditions, which contribute to a better understanding of the dynamics of the occurrence and development of fire. The conclusion is made about the expediency of further research regarding the application of Markov chains to the simulation of the operation of duty control centers, which can significantly improve the effectiveness of emergency response and Keywords: fire, fire protection systems, modeling, Markov chains, transition matrix, and probabilities of states.

Keywords: fire, fire protection systems, modeling, Markov chains, transition matrix, state probabilities.

Для цитирования: Танклевский Л.Т. Прикладные вопросы моделирования систем противопожарной защиты с использованием цепей Маркова / Л.Т. Танклевский, А.А. Таранцев, И.Д. Балабанов, А.М. Алешков, А.И. Бондар // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 129-135. – EDN: DIWEW.

Введение. Актуальность данной статьи обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, ввиду большого количества пожаров [1] обеспечение пожарной безопасности (ПБ) как защищенности личности, общества и государства от пожаров [2] в нашей стране является одной из приоритетных задач. ПБ, в свою очередь, во многом зависит от эффективности систем противопожарной защиты (ППЗ) [3], в частности, от своевременной и успешного срабатывания пожарной сигнализации и автоматических установок пожаротушения (АУП) [4-6] и сдерживания пожара (АУСП) [7]. Одним из путей оценки эффективности функционирования систем ППЗ в целом и АУП и АУСП является моделирование их функционирования.

Во-вторых, ещё в начале XX века русским профессором А.А. Марковым (1856-1922) был разработан исключительно важный и полезный практически математический аппарат [8], в последствии названный его именем и широко известный у нас [9-12] и за рубежом [13-20] как «цепи Маркова». Особую роль в развитии данного направления сыграл выдающийся советский математик А.Н. Колмогоров (1903-1987), обосновавший возможность перехода от цепей Маркова с дискретными состояниями

и дискретным временем к системам линейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику состояний исследуемого объекта.

Как показано в работах [21, 23-29], математический аппарат цепей Маркова позволяет моделировать развитие и тушение пожара на различных объектах с задействованием систем ППЗ. Тем не менее, практический интерес представляет использование марковских цепей для моделирования ситуаций, связанных с пожаром, как обратимых (например, пожар на автостоянке закрытого типа, после тушения которого и проведения ремонтно-восстановительных работ автостоянка может вернуться к работе в штатном режиме), так и необратимых (например, пожар на складе продукции, когда её часть необратимо повреждается).

Методология, применяемая в данной статье, основывается на использовании цепей Маркова для описания нештатных ситуаций на исследуемом объекте. Это предполагает следующий порядок действий:

1. Составляется перечень из n возможных состояний $\{S\}$, в которых может пребывать исследуемый объект. Состояниям $\{S\}$, которые образуют полную группу (т.е. других состояний при данной постановке

задачи быть не может) и являются вершинами графа переходов, соответствуют вероятности $\{P\}$, причём $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$.

2. Исходя из логики развития событий на исследуемом объекте, состояния $\{S\}$ соединяются рёбрами-стрелками (если из состояния S_i возможен переход в состояние S_j , то изображается стрелка от S_i к S_j , а если переход от S_i к S_j невозможен, стрелка отсутствует), в результате чего образуется ориентированный граф.

3. Каждому ребру-стрелке ставится в соответствие «вес» $\{l_{ij}\}$, в результате чего ориентированный граф переходов становится «взвешенным» и является марковской цепью.

4. Если процесс с дискретным временем, то весами рёбер являются вероятности переходов, т.е. $l_{ij} = p_{ij}$. Марковская цепь при этом характеризуется матрицей P размером $n \times n$, которая имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix},$$

в которой вероятности диагональных элементов $p_{jj} = 1 - \sum_{i \neq j} p_{ji}$, $j=1, \dots, n$, а сумма вероятностей в каждой j -й строке равна 1. Задаются начальные вероятности состояний $\{S\}$: $P_1^n, \dots, P_n^n$ (как правило, $P_1^n=1, P_j^n=0, j=2, \dots, n$) и с помощью пошаговой процедуры [11] на основе матрицы P находятся вероятности $P_1^k, \dots, P_n^k$ конечных состояний объекта, когда процесс стабилизируется, т.е.: $[P_1^n, \dots, P_n^n] \rightarrow [P_1^k, \dots, P_n^k]$. Для справки: авторами разработана компьютерная программа markoff.exe, упрощающая нахождение численных значений вероятностей $P_1^k, \dots, P_n^k$.

5. Если процесс с непрерывным временем, то, как показал А.Н. Колмогоров, весами рёбер являются интенсивности переходов $\{\lambda\}$ (т.е. $l_{ij} = \lambda_{ij}$), имеющие размерность, обратную времени. При этом цепи Маркова будет соответствовать система из n (по числу состояний $\{S\}$) линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = f_1(P_1, \dots, P_n, \{\lambda_{ij}\}), \\ \dots \\ \frac{dP_n}{dt} = f_n(P_1, \dots, P_n, \{\lambda_{ij}\}) \end{cases} \quad (1)$$

($f_1, \dots, f_n$ – функции, обуславливаемые графом переходов), решение которых при начальных условиях $[P_1^n, \dots, P_n^n]$ позволяет найти динамику вероятностей $P_1(t), \dots, P_n(t)$ состояний объекта и в ряде случаев может быть получено аналитически. Для стационарного случая, когда $t \rightarrow \infty$ и производные в левых частях уравнений (1) обнулятся, получим систему из n алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 0 = f_1(P_1^k, \dots, P_n^k, \{\lambda_{ij}\}), \\ \dots \\ 0 = f_n(P_1^k, \dots, P_n^k, \{\lambda_{ij}\}), \end{cases} \quad (2)$$

из решения которых можно найти установившиеся вероятности $P_1^k, \dots, P_n^k$ состояний $\{S\}$.

Результаты расчетов рассмотрены на примерах.

Пример 1. Исследуемым объектом является автостоянка закрытого типа [30] для легковых авто-

мобилей с бензиновыми двигателями. Стоянка снабжена АУП [5, 6]. В первом приближении такая автостоянка может пребывать в пяти ($n=5$) состояниях, приведенных в таблице 1. Соответствующая этим состояниям марковская цепь (граф переходов) приведена на рисунке 1. Стоянка является объектом с обратимыми состояниями, поскольку после возникновения пожара и его тушения она всё равно возвращается в состояние S_1 , т.е. может продолжить штатное функционирование.

Таблица 1 – Состояния автостоянки в процессе функционирования

$\{S\}$	Состояния	Ущерб
S_1	Штатный режим функционирования	
S_2	Возгорание	
S_3	АУП сработала, возгорание потушено	минимальный
S_4	АУП отказала, пожар потушен прибывшими пожарными подразделениями	значительный
S_5	Проведение ремонтно-восстановительных работ (PBP)	

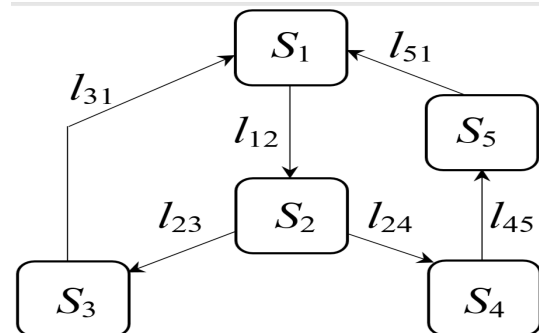


Рисунок 1 – Марковская цепь (граф переходов) в соответствии с таблицей 1

Полагая, что функционирование автостоянки можно описать марковской цепью с дискретным временем (т.е. $l_{ij} = p_{ij}$), получаем матрицу P :

$$P = \begin{bmatrix} 1 - p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - p_{23} - p_{24} & p_{23} & p_{24} & 0 \\ p_{31} & 0 & 1 - p_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - p_{45} & p_{45} \\ p_{51} & 0 & 0 & 0 & 1 - p_{51} \end{bmatrix}.$$

Задав вероятностями переходов $p_{12}=0,01$; $p_{23}=0,7$; $p_{24}=0,3$; $p_{31}=0,5$; $p_{45}=0,1$; $p_{51}=0,05$ (в данном примере приняты условно) получим конкретный вид матрицы P :

$$P = \begin{bmatrix} 0,99 & 0,01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0,3 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0,1 \\ 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0,95 \end{bmatrix}$$

Положив $P_1^n=1$ (в исходном состоянии автостоянка начала работать в штатном режиме) и воспользовавшись методом [11] (программой markoff.exe), находим динамику вероятностей состояний, приведенной в таблице 2. Из неё видим, что на 165-ом шаге эта динамика стабилизировалась, и вероятности установившихся состояний: $P_1^{165}=0,8977$; $P_2^{165}=0,090$;

$P_3^{165}=0,0126$; $P_4^{165}=0,0269$; $P_5^{165}=0,0539$. Это означает, что автостоянка будет работать в штатном режиме с вероятностью $\approx 90\%$.

Таблица 2 – Динамика вероятностей состояний

k	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
0	1.0000	.00000	.00000	.00000	.00000
1	.9900	.0100	.0000	.0000	.0000
2	.9801	.0099	.0070	.0030	.0000
3	.9738	.0098	.0104	.0057	.0003
4	.9693	.0097	.0121	.0080	.0009
5	.9657	.0097	.0129	.0102	.0016
10	.9518	.0095	.0134	.0178	.0075
15	.9404	.0094	.0133	.0222	.0148
20	.9310	.0093	.0131	.0246	.0220
25	.9234	.0092	.0130	.0260	.0284
30	.9174	.0092	.0129	.0266	.0339
35	.9127	.0091	.0128	.0270	.0384
40	.9091	.0091	.0128	.0271	.0419
50	.9042	.0090	.0127	.0272	.0469
60	.9014	.0090	.0126	.0271	.0499
70	.8997	.0090	.0126	.0271	.0516
80	.8988	.0090	.0126	.0270	.0526
90	.8983	.0090	.0126	.0270	.0531
100	.8980	.0090	.0126	.0270	.0535
150	.8977	.0090	.0126	.0269	.0538
160	.8977	.0090	.0126	.0269	.0538
165	.8977	.0090	.0126	.0269	.0539

Примечание: k – номер шага

Эту же задачу можно решить с использованием метода Колмогорова. Тогда $I_{ij}=\lambda_{ij}$, и система дифференциальных уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{31}P_3 + \lambda_{51}P_5 \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2; \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3; \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - \lambda_{45}P_4; \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4 - \lambda_{51}P_5. \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (3) с учётом того, что $P_i^n=1$ было получено численными методами для интенсивностей переходов $\lambda_{12}=1$; $\lambda_{23}=70$; $\lambda_{24}=30$; $\lambda_{31}=50$; $\lambda_{45}=10$; $\lambda_{51}=5$ (также заданы условно и пропорциональны $\{p_{ij}\}$), динамика вероятностей $P_i(t)$, ..., $P_5(t)$ приведена в таблице 3. Как видим, полученные результаты совпадают с результатами в таблице 2, что подтверждает их объективность.

Таблица 3 – Динамика вероятностей состояний

t	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	Σ
. 00	1.000	.0000	.0000	.0000	.0000	1.0000
. 10	.9536	.0096	.0132	.0166	.0071	1.0001
. 20	.9317	.0093	.0131	.0242	.0217	1.0001
. 30	.9182	.0092	.0129	.0264	.0333	1.0001
. 40	.9098	.0091	.0128	.0271	.0413	1.0001
. 50	.9047	.0091	.0127	.0272	.0464	1.0001
. 60	.9018	.0090	.0126	.0271	.0495	1.0001
. 70	.9000	.0090	.0126	.0271	.0513	1.0001
. 80	.8990	.0090	.0126	.0270	.0524	1.0001
. 90	.8985	.0090	.0126	.0270	.0530	1.0001
1.00	.8982	.0090	.0126	.0270	.0534	1.0001
1.10	.8980	.0090	.0126	.0269	.0536	1.0001
1.20	.8978	.0090	.0126	.0269	.0537	1.0000
1.30	.8978	.0090	.0126	.0269	.0538	1.0001
1.40	.8977	.0090	.0126	.0269	.0538	1.0001

Примечание: Σ – проверочная сумма

Вероятности $P_1^k, \dots, P_5^k$ могут быть найдены с использованием системы (3), обнулив производные в левых частях и придя к системе из 5-и линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{12}P_1^k + \lambda_{31}P_3^k + \lambda_{51}P_5^k; \\ 0 = \lambda_{12}P_1^k - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2^k; \\ 0 = \lambda_{23}P_2^k - \lambda_{31}P_3^k; \\ 0 = \lambda_{24}P_2^k - \lambda_{45}P_4^k; \\ 0 = \lambda_{45}P_4^k - \lambda_{51}P_5^k. \end{cases} \quad (4)$$

Её решение получено в аналитическом виде:

$$\begin{cases} P_1^k = \left[1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} \left(1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31}} + \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{45}} + \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{51}} \right) \right]^{-1}; \\ P_2^k = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} P_1^k; \\ P_3^k = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} \cdot \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{31}} P_1^k; \\ P_4^k = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} \cdot \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{45}} P_1^k; \\ P_5^k = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} \cdot \frac{\lambda_{24}}{\lambda_{51}} P_1^k. \end{cases} \quad (5)$$

Поставив в уравнения (5) вышеприведенные интенсивности $\{\lambda\}$, нетрудно убедиться, что получим $P_1^k=0,8977$; $P_2^k=0,090$; $P_3^k=0,0126$; $P_4^k=0,0269$; $P_5^k=0,0539$.

Таким образом, приведенная цепь Маркова для функционирования автостоянки как объекта с обратимыми состояниями позволяет получить динамику вероятностей этих состояний как для случаев дискретного, так и для непрерывного времени. При этом полученные установившиеся вероятности состояний одинаковы.

Пример 2. Исследуемым объектом является склад, в котором хранится готовая продукция, например, смартфоны, предназначенные для продажи. Склад снабжен АУП [5, 6]. В первом приближении такой склад может пребывать в пяти ($n=5$) состояниях, приведенных в таблице 3. Соответствующая этим состояниям марковская цепь (граф переходов) – на рисунке 2а. Склад является объектом с необратимыми состояниями, поскольку после возникновения пожара и его тушения часть продукции или вся она может быть безвозвратно повреждена опасными факторами пожара (ОФП) и огнетушащими веществами (ОТВ)

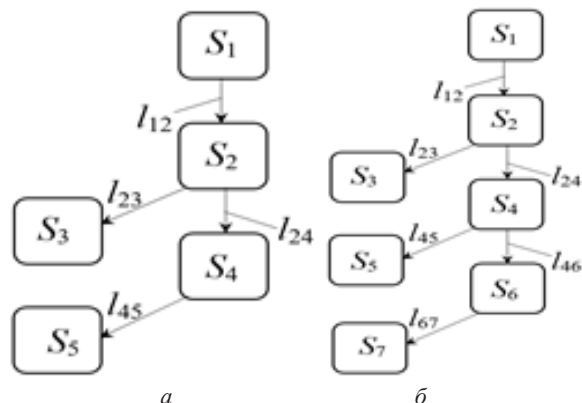


Рисунок 2 – Графы переходов применительно к пожару на складе

Таблица 3 – Состояния склада в процессе функционирования

{S}	Состояния	Ущерб
S ₁	Штатный режим функционирования	
S ₂	Возгорание	
S ₃	АУП сработала, возгорание потушено, часть продукции безвозвратно повреждена	минимальный
S ₄	АУП отказала, пожар потушен прибывшими пожарными подразделениями	
S ₅	Значительная часть продукции безвозвратно повреждена воздействием ОФП и ОТВ	значительный

Полагая, что состояния склада можно описать марковской цепью с дискретным временем (т.е. $l_{ij} = p_{ij}$), получаем матрицу P:

$$P = \begin{bmatrix} 1-p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-p_{23}-p_{24} & p_{23} & p_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-p_{45} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если марковская цепь с непрерывным временем (т.е. $l_{ij} = \lambda_{ij}$), получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -\lambda_{12}P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} = \lambda_{12}P_1 - (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2; \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{23}P_2; \\ \frac{dP_4}{dt} = \lambda_{24}P_2 - \lambda_{45}P_4; \\ \frac{dP_5}{dt} = \lambda_{45}P_4. \end{cases} \quad (6)$$

В обоих случаях состояния S₃ и S₅ являются поглощающими (в вершины S₃ и S₅ графа на рисунке 2а рёбра-стрелки только входят, а выходящих нет), т.е. в итоге $P_3^k + P_5^k = 1$. При этом возникает проблема нахождения значений P_3^k и P_5^k . Для решения этой проблемы при различных вероятностях переходов P_{12} , P_{23} , P_{24} и P_{45} были проведены расчётные оценки величин P_3^k и P_5^k , поскольку из выражения (7) следует: $P_1^k = P_2^k = P_4^k = 0$. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Оценка влияния вероятностей переходов на значения P_3^k и P_5^k

№ п/п	P_{12}	P_{23}	P_{24}	P_{45}	P_3^k	P_5^k
1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,40	0,60
2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5333	0,4667
3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	0,50
4	0,1	0,9	0,3	0,6	0,75	0,25
5	0,9	0,1	0,6	0,3	0,1429	0,8571

Анализ данных таблицы 4 позволил получить следующие выражения:

$$P_3^k = \frac{P_{23}}{P_{23} + P_{24}} \quad (7)$$

$$P_5^k = \frac{P_{24}}{P_{23} + P_{24}} \quad (8)$$

Более сложным представляется случай, когда склад является объектом с тремя необратимыми состояниями S₃, S₅ и S₇ (табл. 5, рис. 2б).

Таблица 4 – Состояния склада в процессе функционирования

{S}	Состояния	Ущерб
S ₁ ÷S ₅	Как и в таблице 2	
S ₆	Пожар сложный, тушение по повышенному номеру	
S ₇	Безвозвратное повреждение всей продукции, обрушение склада	максимальный

Матрица P в этом случае принимает вид:

$$P = \begin{bmatrix} 1-p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-p_{23}-p_{24} & p_{23} & p_{24} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-p_{45}-p_{46} & p_{45} & p_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-p_{67} & p_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

В итоге $P_3^k + P_5^k + P_7^k = 1$. Как и ранее, возникает проблема нахождения значений P_3^k , P_5^k и P_7^k . Для решения этой проблемы также были проведены расчётные оценки величин P_3^k , P_5^k и P_7^k (очевидно: $P_1^k = P_2^k = P_4^k = P_6^k = 0$) при различных значениях вероятностей переходов P_{12} , P_{23} , P_{24} , P_{45} , P_{46} и P_{67} методом [11] с учётом матрицы P. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Оценка влияния вероятностей переходов на значения P_3^k , P_5^k и P_7^k

№ п/п	P_{12}	P_{23}	P_{24}	P_{45}	P_{46}	P_{67}	P_3^k	P_5^k	P_7^k
1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,40	0,2667	0,3333
2	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,5333	0,2545	0,2121
3	0,1	0,9	0,1	0,9	0,1	0,9	0,90	0,09	0,01
4	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,5	0,3750	0,2734	0,3515
5	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1	0,5	0,5833	0,3125	0,1042
6	0,1	0,9	0,2	0,8	0,3	0,7	0,8182	0,1322	0,0496
7	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,50	0,25	0,25
8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,50	0,25	0,25
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,50	0,25	0,25
10	0,1	0,5	0,9	0,1	0,5	0,9	0,3571	0,1071	0,5356
11	0,9	0,5	0,1	0,9	0,5	0,1	0,8333	0,1071	0,0595

Как и ранее, для вероятности P_3^k справедливо выражение (7), в чем можно убедиться из таблицы 6. Но для вероятностей P_5^k и P_7^k аналогичные выражения пока не найдены.

Интересно отметить, что для графа с состояниями S₈ и S₉ (S₉ – поглощающее), аналогичного графам на рисунке 2, также будет справедливо выражение (7). Ввиду ограниченного объёма статьи расчёты не приводятся.

Обсуждение. В результате проведённого исследования показано следующее:

1. Марковские цепи являются эффективным математическим аппаратом, позволяющим оценивать вероятности состояний объектов при возникновении пожара и его тушении. При этом могут моделироваться как обратимые (т.е. объект может вернуться в штатный режим функционирования), так и необратимые ситуации (безвозвратные потери объекта и/

или хранящейся продукции).

2. Для упрощения оценки установившихся вероятностей $P_1^k, \dots, P_n^k$ можно предложить систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\sum_{i=1}^n l_{1i} P_i^k + l_{21} P_2^k + l_{31} P_3^k + \dots + l_{n1} P_n^k, \\ 0 = l_{12} P_1^k - \sum_{i=2}^n l_{2i} P_i^k + l_{32} P_3^k + \dots + l_{n2} P_n^k, \\ 0 = l_{13} P_1^k + l_{23} P_2^k - \sum_{i=3}^n l_{3i} P_i^k + \dots + l_{n3} P_n^k, \\ \dots \\ 0 = l_{1n} P_1^k + l_{2n} P_2^k + l_{3n} P_3^k + \dots - \sum_{i=n}^n l_{ni} P_i^k, \end{cases} \quad (9)$$

Применительно к примеру 1 система уравнений (9) принимает вид:

$$\begin{cases} 0 = -l_{12} P_1^k + l_{31} P_3^k + l_{51} P_5^k; \\ 0 = l_{12} P_1^k - (l_{23} + l_{24}) P_2^k; \\ 0 = l_{23} P_2^k - l_{31} P_3^k; \\ 0 = l_{24} P_2^k - l_{45} P_4^k; \\ 0 = l_{45} P_4^k - l_{51} P_5^k; \end{cases} \quad (10)$$

Применительно к примеру 2 - соответственно:

$$\begin{cases} 0 = -l_{12} P_1^k; \\ 0 = l_{12} P_1^k - (l_{23} + l_{24}) P_2^k; \\ 0 = l_{23} P_2^k; \\ 0 = l_{24} P_2^k - l_{45} P_4^k; \\ 0 = l_{45} P_4^k; \end{cases} \quad (11)$$

и

$$\begin{cases} 0 = -l_{12} P_1^k; \\ 0 = l_{12} P_1^k - (l_{23} + l_{24}) P_2^k; \\ 0 = l_{23} P_2^k; \\ 0 = l_{24} P_2^k - (l_{45} + l_{46}) P_4^k; \\ 0 = l_{45} P_4^k; \\ 0 = l_{46} P_4^k - l_{67} P_6^k; \\ 0 = l_{67} P_6^k. \end{cases} \quad (12)$$

В справедливости выражений (10)-(12) можно убедиться, подставив вместо весов $\{l\}$ численные значения вероятностей переходов $\{p\}$ или $\{\lambda\}$. В частности, из (11) следует: $P_1^k = P_2^k = P_4^k = 0$, ввиду чего $P_3^k + P_5^k = 1$. Из (12) следует: $P_1^k = P_2^k = P_4^k = P_6^k = 0$, ввиду чего $P_3^k + P_5^k + P_7^k = 1$.

Выводы. Таким образом, рассмотрены вопросы, связанные с применением цепей Маркова для нахождения вероятностей ситуаций, связанных с пожарами на объектах, имеющих ППЗ. На примерах объектов с обратимыми состояниями (пожар, на автостоянке) и необратимыми состояниями (пожар на складе с продукцией) показана возможность определения вероятностей их состояний с использованием цепей Маркова, как с дискретным, так и с непрерывным временем. Приведено универсальное выражение для оценки установившихся вероятностей состояний.

В дальнейшем представляется целесообразным рассмотреть вопросы применения марковских цепей к моделированию работы дежурно-диспетчерских служб в рамках теории массового обслуживания [11, 22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пожары и пожарная безопасность в 2021 г. Статист. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.
2. Федеральный закон от 12.12.1994 г. № 69-ФЗ (ред.08.08.24) «О пожарной безопасности».

3. Федеральный закон от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ (ред.25.12.23) «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

4. Свод правил. СП 484.1311500.2020. Системы ППЗ. Системы пожарной сигнализации и автоматизация систем ППЗ. Нормы и правила проектирования.

5. Свод правил. СП 485.1311500.2020. Системы ППЗ. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.

6. Свод правил. СП 486.1311500.2020 Системы ППЗ. Перечень зданий, сооружений, помещений и оборудования, подлежащих защите автоматическими установками пожаротушения и системами пожарной сигнализации Требования пожарной безопасности.

7. ГОСТ Р 71080-2023 Установки сдерживания пожара водные автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний.

8. Марков А.А. Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга. – Известия физико-математического общества при Казанском университете. – 2-я серия. – Том 15. (1906). – С. 135-156.

9. Большая Российская энциклопедия. Т.19. М.: БРЭ, 1012. – 767 с. (с.162).

10. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. – М.: МЦНМО, 2010. – 295 с.

11. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. – 552 с.

12. Романюк Е.В. Вероятностная модель управления технологическим процессом на основе марковской цепи // Моделирование сложных процессов и систем: сб. трудов секции № 10 XXXII Междунар. науч.-практ. конф. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2022. – С. 57-60.

13. Kullback S. Information theory and statistics. – Wiley, New York, 1959.

14. Kemeny J.G., Snell J.L. Finite Markov chains. – The University Series in Undergraduate Mathematics. – Princeton: Van Nostrand, 1960.

15. Morimoto T. Markov processes and the H-theorem. – J. Phys. Soc. Jap. 12 (1963), 328-331.

16. Burg J.P. The Relationship Between Maximum Entropy Spectra and Maximum Likelihood Spectra, Geophysics 37(2) (1972), 375-376.

17. Tsallis C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. J. Stat. Phys. 52 (1988), 479-487.

18. Нуммелин Э. Общие неприводимые цепи Маркова и неотрицательные операторы. – М.: Мир, 1989. – 207 с.

19. Poznyak A.S., Najim K., Gomez-Ramirez E. Self-learning control of finite Markov chains. CRC Press, 2018.

20. Gagniuc, Paul A. Markov Chains: From Theory to Implementation and Experimentation. – USA, NJ: John Wiley & Sons, 2017. – P. 2-8. – ISBN 978-1-119-38755-8.

21. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабинов И.А. Метод управления поддержанием готовности средств ППЗ с использованием марковских цепей // Вестник СПбУ ГПС МЧС России, № 4, 2022. – С.60-69.

22. Таранцев А.А. Инженерные методы теории массового обслуживания. Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: Наука, 2007. – 175 с.

23. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Кожевин Д.Ф. О каскадном развитии взрывопожарной ситуации на автостоянке // Вестник СПбУ ГПС МЧС России, № 4, 2023. – С.16-25.

24. Таранцев А.А., Поташев Д.А., Матвеев А.В., Шкитров М.Е. О моделировании каскадного развития ЧС на подземных автостоянках // Проблемы управления рисками в техносфере, №3 (67), 2023. – С.131-140.

25. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Балабанов И.Д. Моделирование процесса эксплуатации систем противопожарной защиты с использованием марковских цепей // Пожаровзрывобезопасность, №2 (23), 2024. – С. 59-67.

26. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О способе моделирования пожаровзрывоопасных ситуаций на паромках и плавучих автостоянках с использованием цепей Маркова // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 1 часть 1. – С.270-275.

27. Таранцев А.А., Турсенев С.А., Поташев Д.А., Ключ В.В. О моделировании каскадного развития и тушения пожаров в подземных автостоянках // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 2 (33). – С. 211-221.

28. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании развития и тушения пожара при паромной перевозке железнодорожных составов // Морские интеллектуальные технологии, №2, часть 1, 2024. – С. 305-311.

29. Таранцев А.А., Маринов М.Л., Коновалов И.Н. О моделировании экологической и пожарной безопасности морских нефтяных терминалов цепями Маркова // Морские интеллектуальные технологии, №3, часть 1, 2024. – С.339-346.

30. Свод правил СП 113.13330.2016. Стоянки автомобилей. Актуализированная редакция СНиП 21-02-99*. Утв. Приказом Минстроя России от 07.11.2016 № 776/пр (ред. от 17.09.2019).

Статья поступила в редакцию 14.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 631.3:331.45:681.84/.85

EDN: FSWZEV

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В КАБИНЕ ТРАКТОРА К-701МЗ ПОСЛЕ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА

© Автор (ы) 2025

SPIN: 1003-8910

AuthorID: 753858

ORCID: 0000-0003-0415-1925

ScopusID: 57208260649

ГАЙДА Анна Станиславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда»

*Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова
(291008, Россия, ЛНР, г. Луганск, тер. ЛНАУ д.1, e-mail: annah1823@gmail.com)*

SPIN: 1176-1210

AuthorID: 368269

ORCID: 0000-0003-2526-9412

ScopusID: 57189602324

ЕГОРОВА Ирина Викторовна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Физическая культура, спорт и техносферная безопасность»
*Азово-Черноморского инженерного института – филиал Донского государственного
аграрного университета в г. Зернограде
(347740, Россия, Зерноград, улица Ленина, 21, e-mail: Orishenkoirina@mail.ru)*

Аннотация. В статье рассматривается проблема шума и вибрации в кабине трактора К-701МЗ после проведения капитального ремонта. Целью исследования является определение уровня вибрации и шума в кабине трактора с целью оценки их соответствия нормативным требованиям, влияющих на условия труда оператора. Исследование включает анализ изменений в акустических и вибрационных характеристиках в рабочей зоне оператора трактора в результате выполненных ремонтных работ. Рассмотрены основные источники шума и вибрации, проведены замеры после ремонта. Осуществлен сравнительный анализ полученных данных. Методика исследования включает измерение уровня шума и вибрации с использованием сертифицированного оборудования и программного обеспечения, а также математический анализ полученных данных. Проведен анализ спектральных характеристик шума и вибрации для выявления их основных источников. Полученные результаты исследования имеют практическую ценность для оценки влияния выполненного ремонта на рабочие условия оператора трактора и выявления возможных направлений для дальнейшей оптимизации конструкции трактора, направленных на снижение уровней шума и вибрации на оператора в кабине трактора.

Ключевые слова: оператор трактора, шум, вибрация, кабина трактора, уровень звука, сиденье трактора, санитарные нормы, рабочее место оператора, уровень звукового давления, частота.

COMPARATIVE ANALYSIS OF NOISE CHARACTERISTICS IN THE CABIN OF THE K-701-MZ TRACTOR AFTER MAJOR REPAIRS

© Author(s) 2025

GAYDA Anna Stanislavovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Occupational Safety

*Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov
(291008, Russia, LPR, Lugansk, LNAU area, 1, e-mail: annah1823@gmail.com)*

EGOROVA Irina Viktorovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Physical Education, Sports and Technosphere Safety
*Azov-Black Sea Engineering Institute - branch of the Don State
Agricultural University in Zernograd*

(347740, Russia, Zernograd, Lenin Street, 21, e-mail: Orishenkoirina@mail.ru)

Abstract. The article deals with the problem of noise and vibration in the cabin of tractor K-701MZ after overhaul. The purpose of the study is to determine the level of vibration and noise in the tractor cab in order to assess their compliance with regulatory requirements, affecting the working conditions of the operator. The research includes analysis of changes in acoustic and vibration characteristics in the working area of the tractor operator as a result of performed repair works. The main sources of noise and vibration are considered, measurements after repair are made. The comparative analysis of the obtained data is carried out. The research methodology includes measurement of noise and vibration levels using certified equipment and software, as well as mathematical analysis of the obtained data. The spectral characteristics of noise and vibration were analyzed to identify their main sources. The obtained results of the research are of practical value to assess the impact of the performed repair on the working conditions of the tractor operator and to identify possible directions for further optimization of the tractor design aimed at reducing noise and vibration levels on the operator in the tractor cab.

Keywords: tractor operator, noise, vibration, tractor cab, sound level, tractor seat, sanitary norms, operator's workplace, sound pressure level, frequency.

Для цитирования: Гайда А.С. Сравнительный анализ шумовых характеристик в кабине трактора К-701МЗ после капитального ремонта / А.С. Гайда, И.В. Егорова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 136-140. – EDN: FSWZEV.

Введение. Тракторы играют ключевую роль в сельском хозяйстве, обеспечивая выполнение различных задач, начиная от пахоты земель, заканчивая сборкой урожая. В этот период операторы тракторов сталкиваются с серьезными вызовами, связанными долгими часами работы в условиях постоянного шума и вибраций. Общеизвестно, что шум является постоянным спутником всех сельскохозяйственных предприятий и зачастую является показателем эксплуатационного состояния оборудования и технической культуры предприятий. Многочисленными исследованиями установлено, что уровень шума на рабочем месте оператора трактора зачастую превышает устанавливаемые санитарными требованиями допустимыми нормами, что может создавать риск развития профессиональных заболеваний, связанных с воздействием шума, и снижает комфорт работы [1, 2].

Современные подходы к исследованию и снижению шума и вибрации в тракторах основываются на развитии научно-технического прогресса, который открывает новые возможности для диагностики и анализа акустических и вибрационных параметров. Однако применение этих методов требует соблюдения стандартов и использования специализированного программного и измерительного оборудования, что особенно актуально для оценки шумовых и вибрационных нагрузок в условиях эксплуатации трактора [3, 4].

Уровень шума на рабочем месте оператора трактора часто превышает установленные санитарные нормы. Недостаточное внимание со стороны производителей тракторов к этой проблеме приводит к тому, что новая техника, поступающая в эксплуатацию, может создавать риски для здоровья операторов. В рабочих условиях шум обычно воздействует на организм оператора вместе с вибрацией, усиливая негативное влияние [5-7].

Шум и вибрация в кабине трактора зависят от множества факторов, включая конструкционные особенности машины, режим её работы, состояние двигателя и трансмиссии, а также внешние условия эксплуатации. В условиях интенсивной эксплуатации сельскохозяйственных машин важное значение приобретает исследование и контроль акустической и вибрационной среды в кабине, что позволяет своевременно выявлять потенциальные источники дискомфорта и принимать меры по их снижению [5, 8, 9].

Целью данного исследования является анализ уровня шума и вибрации в кабине трактора после капитального ремонта с целью оценки его

соответствия нормативным требованиям [6, 10, 11]. В рамках работы проведены комплексные измерения, включая анализ акустического и вибрационного фона в различных режимах работы трактора, что позволяет выявить зоны превышения нормативных показателей [12-14].

Методология. На основе теоретических предпосылок был проведен анализ действующих стандартов и норм в сочетании с оценкой математического обеспечения шумомеров. Также разработан алгоритм действий оператора шумомера с использованием адаптированного метода отображения информации, учитывающего условия эксперимента [10, 11].

В качестве объекта исследования рассматривается трактор после капитального ремонта, в процессе которого были проведены работы по замене и восстановлению ключевых элементов, влияющих на параметры вибрации и шума в рабочей зоне оператора [12, 13]. Цель состоит в определении уровня вибрации и шума в кабине трактора с целью оценки их соответствия нормативным требованиям, влияющих на условия труда оператора трактора, для повышения комфорта и безопасности эксплуатации [14-18].

Методика исследования включает измерение уровня шума и вибрации с использованием сертифицированного оборудования и программного обеспечения, такого как шумомеры и вибромеры [16, 19]. Анализ спектральных характеристик шума и вибрации для выявления их основных источников. Сравнение полученных данных с установленными нормативами для определения соответствия требованиям безопасности, проводимый в контрольных точках кабины трактора. Измерения уровня звукового давления выполняются с применением профессионального оборудования и программного обеспечения, что позволит зафиксировать показатели в октавных полосах частот от 50 до 8000 Гц, с особым вниманием к полосе на частоте 500 Гц, где наиболее часто регистрируется превышение допустимого уровня [17, 20].

Для оценки вибрационных характеристик используется оборудование, соответствующее требованиям стандартов, позволяющее выявить колебательные воздействия на рабочее место оператора. На основе полученных данных проводится анализ изменений в характеристиках трактора после капитального ремонта, с целью выявления ключевых источников шума и вибрации и разработки рекомендаций по их снижению для улучшения условий работы оператора [18, 21-23].

Вибрационные параметры регистрируются в соответствии с установленными стандартами, с

учетом воздействия вибрации на рабочее место оператора [19, 24]. На основе полученных данных проводится оценка изменений, произошедших в конструкции и эксплуатационных характеристиках трактора после капитального ремонта, с целью выявления возможных улучшений и оптимизации рабочего процесса [20, 25-27].

Оценка влияния прироста вибрации по среднеквадратичным частотам октавных полос на сиденье трактора и кабины трактора проводилась в диапазонах 2 Гц, 4 Гц, 8 Гц, 16 Гц, 31,5 Гц, 63 Гц, 125 Гц, 250 Гц; измерение уровня вибрации на рулевом колесе трактора производили в аналогичном частотном диапазоне [21, 28-31].

Выбор методики, включающей измерение звукового давления и вибрационных характеристик в октавных полосах частот, позволил выявить критические частоты и зоны акустического дискомфорта, особенно в диапазоне 500 Гц, где наиболее часто наблюдается превышение допустимых значений.

Полученные данные о распределении уровней шума и вибрации в контрольных точках помогут в дальнейшем совершенствовании конструкции и

технологии ремонта, обеспечивая повышение уровня комфорта и безопасности рабочих условий оператора трактора [22, 31, 32].

Результаты. Эффективность использования трактора и мобильных агрегатов на его базе неразрывно связана с такими важнейшими слагаемыми качества, как технико-эстетический уровень и условия труда оператора трактора. Установлено, что шум в кабине трактора обусловлен работой двигателя, трансмиссии и других механизмов, причем его уровень варьируется в зависимости от режима эксплуатации. В ряде случаев уровень шума может достигать 92 дБА. Нормативное значение на рабочем месте оператора трактора превышает допустимый показатель на 8 дБА (рис. 1).

Внешний шум с левой стороны трактора обычно определяется конструктивным расположением основных источников шума, таких как двигатель и выхлопная труба [4]. Повышенный уровень шума в этой зоне может оказывать воздействие на окружающую среду и оператора при открытых дверях или окнах кабины, который превышает допустимый уровень на 14 дБА и с правой стороны превышение составляет 10 дБА [23, 33, 34].

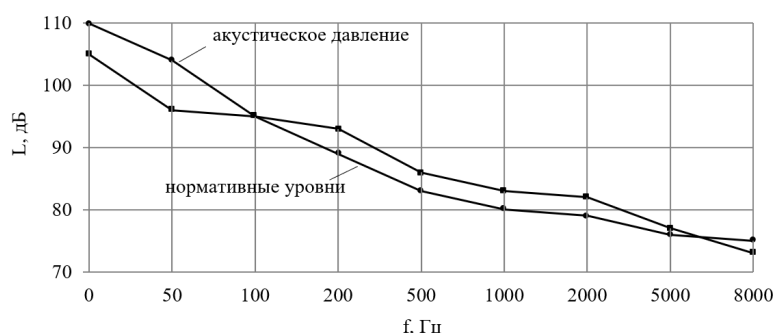


Рисунок 1 – График акустического давления в кабине трактора

При движении трактора в кабине оператора наблюдается неравномерное звуковое давление в октавных полосах частот. Наибольшая интенсивность звука фиксируется в низкочастотном диапазоне, что обусловлено вибрацией двигателя, трансмиссии и элементов шасси, что представлено на первом рисунке. Эти частоты оказывают наибольшее влияние на восприятие шума оператором трактора.

Измерения уровней звукового давления показывают, что низкочастотные шумы до 400 Гц доминируют на рабочем месте оператора трактора из-за колебаний крупногабаритных механизмов и нормативные значения превышают 1-3 дБ. В среднечастотном диапазоне от 250 до 1000 Гц интенсивность звука обусловлена работой трансмиссии и вращающихся частей что превышает допустимое значение минимум 7 дБ, а в высокочастотной области выше 1000 Гц преобладают шумы от вибрации мелких компонентов вентиляции.

Замеры вибрации рабочего места оператора проводились во время движения трактора. Вибрация рабочего места оператора трактора при движении

по грунтовой дороге значительно усиливается из-за неровностей покрытия, что приводит к повышенной передаче колебаний через подвеску и шасси на кабину. Скорость трактора на момент движения составляла 10-15 км/ч.

Амплитуда вибраций фиксировались на сиденье оператора в трех плоскостях: вертикальной, продольной и поперечной.

На рисунке 2 показано, как меняется уровень вибрации кабины по измеряемым направлениям. Можно заметить, что на высоких частотах вибрация ослабевает, а на низких частотах превышает нормативные значения [1]. Кроме того, проводились замеры вибрации при работающем двигателе с такой частотой вращения вала, при которой в рабочем диапазоне наблюдается лишь незначительная вибрация.

Из таблицы 1 видно, что вибрация на сиденье оператора в вертикальной плоскости, продольной и поперечной плоскостях превышает норму. Однако на частотах 31,5 – 250 Г наблюдается снижение вибрации до нормального уровня.

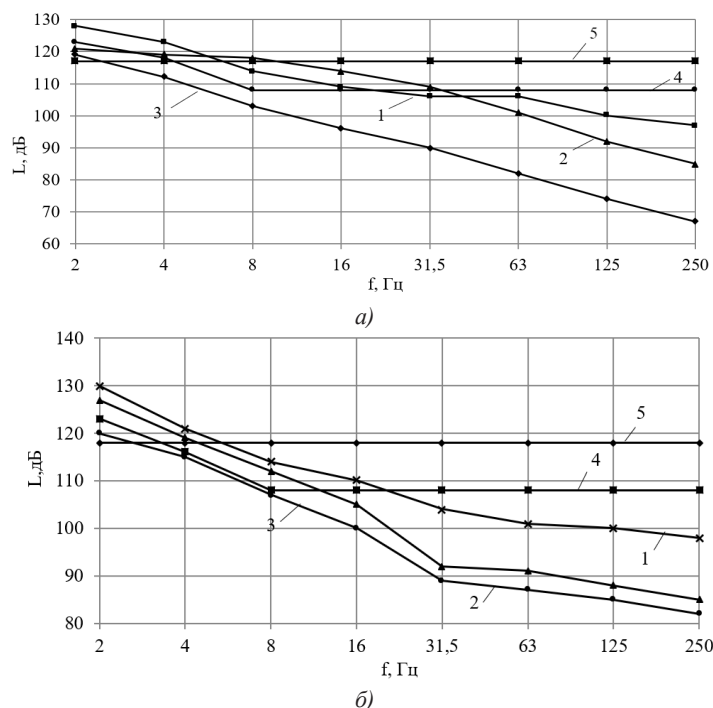


Рисунок 2 – Амплитудные показатели вибрации сиденья (а) и кабины (б) трактора К-701МЗ

1 – вертикальное направление; 2 – продольное направление; 3 – поперечное направление;
4 – предельно допустимые уровни для вертикального направления; 5 – предельно допустимые уровни для продольного и поперечного направлений

Таблица 1 – Показатели превышения норм вибрационных уровней

Трактор	Вертикальная плоскость, дБА	Продольная плоскость, дБА	Поперечная плоскость, дБА
Сиденье кабины трактора	1-5	1-3	1-3
Кабина трактора	1-8	2-5	3

Обсуждение. Шумовые характеристики в кабине трактора имеют большое значение для комфорта и безопасности оператора трактора. Для проведения исследования был проведен сравнительный анализ шумовых характеристик в кабине трактора до и после капитального ремонта. Сравнили уровень шума и вибрации в различных диапазонах частот. В первую очередь, была подготовлена методика измерения шума и вибрации в кабине трактора. Для этого использовали специализированное оборудование, такое как шумомеры и виброметры. Затем были получены данные до и после капитального ремонта для сравнения и анализа.

Проведенное исследование показало, что вибрация на сиденье оператора трактора в вертикальной плоскости в диапазоне частот 2-16 Гц превышает норму на 1-5 дБ, а в продольной и поперечной плоскостях на частотах 2-8 Гц превышение составляет 1-3 дБ. Однако на частотах 31,5-250 Гц наблюдается отчетливое снижение вибрации до нормального уровня или ниже в любой из упомянутых плоскостей [28].

В итоге полученные результаты послужат основ-

ой для определения эффективности капитального ремонта трактора с точки зрения шумовых характеристик. Результаты исследования помогут владельцам тракторов принимать обоснованные решения о проведении ремонта и техническом обслуживании для обеспечения комфортных условий работы оператора трактора.

Выводы. Проведенное исследование уровней шума и вибрации в кабине трактора К-701 МЗ после капитального ремонта позволило определить ключевые параметры акустического и вибрационного воздействия на оператора трактора. Использование измерительного оборудования и специализированного программного обеспечения обеспечило точность и детализированный анализ частотных характеристик, с акцентом на частоту 500 Гц, где было зафиксировано наиболее значительное отклонение от нормативных значений.

Исследование шума и вибрации в кабине трактора после капитального ремонта имеет практическое значение для повышения комфортности и безопасности работы оператора. Проведение такого исследования поможет оптимизировать процесс обслуживания и увеличит эффективность работы техники.

Результаты измерений представляют ценную информацию для оценки влияния выполненного ремонта на рабочие условия оператора трактора и выявления возможных направлений для дальнейшей оптимизации конструкции трактора, направленных на снижение уровней шума и вибрации в кабине оператора трактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ 33678-2015 Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Внешний шум. Нормы и методы оценки.
2. ГОСТ 12.2.019-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности.
3. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 207. – ISBN 978-985-08-2399-1
4. Chernov A., Butakova M., Kostyukov A. Continuous Monitoring of Work Area Safety at Energy Enterprises by Online Cloud Monitoring and Computer Vision // Proceedings –2021 3rd International Conference on Control Sys-tems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021: 3, Lipetsk, 10-12 november 2021. Lipetsk, 2021. P. 1098–1102. DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632155. EDN: UDKPER.
5. Шарипов, В.М. Конструирование и расчет тракторов / В.М. Шарипов. – Москва: Наука, 2018. – 752 с.
6. Липкович И.Э., Украинцев М.М., Егорова И.В., Пятикопов С.М., Жолобова М.В., Петренко Н.В., Панченко С.В., Токарева А.Н., Матвейкина Ж.В., Гайда А.С. Обеспечение безопасности труда в растениеводческой отрасли: монография. – Тернополь, 2024. – 295 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=75166725>.
7. Egorova, I.V. Regulatory justification of the fundamental concepts of ergonomics in wheeled agricultural machinery / I.V. Egorova, N.V. Petrenko, A.N. Tokareva, S.V. Panchenko, A.E. Kalinin // International Journal of Integrated Engineering. – 2021. – Т. 13. № 6. С. 118-125.
8. Kim E., Fard M., Kato K. A seated human model for predicting the coupled human-seat transmissibility ex-posed to fore-aft whole-body vibration // Applied Ergonomics. – 2020. – Т. 84. – P. 102929.
9. Oncescu T.A., Petcu A., Tarnita D. Evaluation of whole-body vibrations and comfort state of tractor driver for different types of terrain and speeds // Acta technica napocensis-series: applied mathematics, mechanics, and engineering. – 2021. – Т. 64. – №. 1.
10. Липкович И.Э. Основы деятельности инженерно-технической службы и специалиста по охране труда при контроле за безопасностью выполнения работ при ТО и ТР комбайнов и тракторов на сельскохозяйственном предприятии / И.Э. Липкович, И.В. Егорова, Н.В. Петренко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 180. – С. 172-192.
11. Кунаш, М.В. Перспективная модель глушителя шума трактора / М.В. Кунаш, Г.И. Белохвостов, А.И. Мельнов // Актуальные проблемы и перспективы развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: сб. науч. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 7-8 июня 2023 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. технолог. ун-т. – Минск: БГАТУ, 2023. – С. 417-422.
12. Савенков Ф.И., Грачев С.В. Анализ методик контроля производственного шума // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2022: сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции. Курск, 2022. С. 137-141. EDN: XIVXIZ.
13. Распопов, А.С. Нормирование шумов / А.С. Распопов, А.Н. Кузнецов // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 12 февраля 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 26-31. – EDN GUZKHL.
14. Савенков Ф.И., Грачев С.В. Анализ методик контроля производственного шума // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых – 2022: сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции. Курск, 2022. – С. 137-141. EDN: XIVXIZ.
15. Results from Recent Traffic Systems Research and the Implications for Future Work / R. Godwin, P. Mis-iewicz, D. White and others // Acta technol. agr. – 2015. – Vol. 18. – № 3. – P. 57-63.
16. Коханов В.Н. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / В.Н. Коханов, В.М. Емельянов, П.А. Некрасов. – Москва : ИНФРА – М, 2023. – 400 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – DOI 10.12737/2883.
17. Dorokhova N.D., Belokurenko S.A., Medvedeva Zh.V., Kobceva L.V. Sovershenstvovanie organizatsii truda na proizvodstve (Improving labor organization in production). Obrazovanie i nauka v sovremennykh realiyakh: sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Cheboksary, 26 fevralya 2018 goda. Cheboksary: Obschestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Centr nauchnogo sotrudnichestva "Interaktiv plus", 2018, s. 164–166. EDN: YUXYOH (In Russ.).
18. Кузьмина О.В., Исакова А.К. Мероприятия по снижению уровня шума на рабочем месте (на примере организации) // Science Time. 2016. № 10 (34). – С. 154-163. EDN: WYMIYJ.
19. Вихерт Ю.В., Денисова А.Н. Измерение уровня освещенности и шума на рабочем месте // Вестник научных конференций. 2016. № 4-5 (8). – С. 42-43. EDN: VYUOOL.
20. Павлов, П.И. Исследование шума в кабине тракторов / П.И. Павлов, А.В. Наумов // Актуальные проблемы науки и образования на современном этапе: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции: Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Институт экономики и права г. Воронеж, 2015. – С. 223-229. – EDN VCVMGR.
21. Садовников М.А., Попов Г.Г., Мартынов И.С., Рыжкова А.А. Анализ состояния условий труда на предприятиях АПК как фактор безопасности производственной деятельности // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 3 (47). – С. 74-78. EDN: LVMOLJ.
22. Гулынец А.А. Способы защиты от вибрации и перспективные направления ее снижения / А.А. Гулынец, И.П. Криволапов // Наука и Образование. – 2019. – Т. 2, № 2. – С. 233. EDN: MWZPSJ.
23. Липкович, И.Э. Оценочные характеристики некоторых параметров условий труда операторов самоходных сельскохозяйственных машин / И.Э. Липкович, И.В. Егорова, Н.В. Петренко // Вестник аграрной науки Дона. 2020. № 1 (49). – С. 72-81.
24. Кутыков Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства: учебник / Г.М. Кутыков. – Москва: ИНФРА-М, 2016. – 506 с.
25. Ning D. An Active Seat Suspension Design for Vibration Control of Heavy-Duty Vehicles / D. Ning, S. Sun, J. Zhang // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. – 2016 – Vol. 35, № 4. – P. 264-278.
26. Скорев М.М., Дараселая Е.В. Проявления и виды шума в современных общественных отношениях и их безопасность // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2023. № 9(160). – С. 30-36. EDN: DJTRBT.
27. Zafeiropoulos N. Active Noise Control in a Luxury Vehicle: Thesis for PhD / N. Zafeiropoulos, 2017. – 204 p.
28. Abouel-Seoud S.A. Control of driver whole-body vibration ride comfort in agricultural tractor // Agricultural Engineering International: CIGR Journal. – 2019. – Т. 21. – №. 2. – P. 40-51.
29. Kumar V., Saran V.H. Biodynamic model of the seated human body under the vertical whole body vibration exposure // International Journal of Acoustics & Vibration. – 2019. – Т. 24. – №. 4. – P. 657-664.
30. Influence of the human-machine systems (hms) operation mode on the increase of grain-harvesting aggregate productivity / I.E. Lipkovich, I.V. Egorova, N.V. Petrenko, A.S. Gayda // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2019. – Vol. 42, No. 3. – P. 10-14. – DOI 10.26480/jmerd.03.2019.10.14. – EDN WJHPCI.
31. Kromulski J. The vibration energy absorption of tractor operator exposed to vertical whole-body vibration under work of the aggregate tractor-round baler // Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. – 2020. – Т. 65. – №. 1.
32. Kabir M.S.N. Measurement and evaluation of whole body vibration of agricultural tractor operator // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – P. 248-255.
33. ГОСТ 31323-2006 Вибрация. Определение параметров вибрационной характеристики самоходных машин. Тракторы сельскохозяйственные колесные и машины для полевых работ.
34. А.с. 232774 СССР, МПК В 62 d; Кл. 63с, 43/30. Кабина трактора [Текст] / К.Н. Виноградов, А.А. Фролов, Л.П. Барасов (СССР). – 1189491/30-15; Заявлено 07.10.1967; Опубл. 11.12.1968. – Бюл. №1. – 1969. – [Описание авторского свидетельства]. – 2 с.

Статья поступила в редакцию 18.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 504.7: 004 + 06

EDN: BLYWKJ

**ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА:
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

© 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 условиях стремительной цифровизации экономики трансформация системы управления охраной труда становится ключевым фактором обеспечения безопасности производственных процессов. Цифровые технологии открывают принципиально новые возможности для мониторинга, анализа и предупреждения производственных рисков, что определяет актуальность исследования современных подходов к цифровой трансформации системы управления охраной труда (СУОТ). В статье рассматриваются основные направления цифровизации процессов управления охраной труда, проводится комплексный анализ преимуществ внедрения цифровых решений и выявляются потенциальные барьеры на пути цифровой трансформации. Особое внимание уделяется перспективным технологиям, включая искусственный интеллект, интернет вещей и технологии больших данных, которые способны качественно изменить подходы к обеспечению производственной безопасности. На основе систематизации существующих практик и тенденций развития цифровых технологий предложена концептуальная модель цифровой трансформации СУОТ, учитывающая современные требования к обеспечению безопасности труда и технологические возможности их реализации. В исследовании применяются методы системного анализа, позволяющие рассмотреть процесс цифровой трансформации СУОТ как целостную систему взаимосвязанных элементов. Разработанные рекомендации направлены на повышение эффективности внедрения цифровых технологий в практику управления охраной труда и могут быть использованы при проектировании и модернизации систем управления производственной безопасностью на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: охрана труда, цифровая трансформация, управление безопасностью, цифровые технологии, производственные риски, автоматизация процессов, искусственный интеллект, интернет вещей.

DIGITAL TRANSFORMATION OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH MANAGEMENT SYSTEM: MODERN APPROACHES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

© 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: vfir1959@rambler.ru)

Abstract. In the context of rapid digitalization of the economy, the transformation of the occupational safety and health management system becomes a key factor in ensuring the safety of production processes. Digital technologies open up fundamentally new opportunities for monitoring, analyzing and preventing occupational risks, which determines the relevance of studying modern approaches to the digital transformation of the occupational safety and health management system (OSHMS). The article examines the main directions of digitalization of occupational safety management processes, provides a comprehensive analysis of the benefits of implementing digital solutions, and identifies potential barriers to digital transformation. Special attention is paid to promising technologies, including artificial intelligence, Internet of things and big data technologies, which can qualitatively change approaches to ensuring industrial safety. Based on the systematization of existing practices and trends in digital technologies, a conceptual model of digital transformation of OSHMS is proposed, taking into account modern requirements for ensuring occupational safety and technological possibilities for their implementation. The study applies methods of system analysis, allowing to consider the process of digital transformation of OSHMS as an integral system of interrelated elements. The developed recommendations are aimed at improving the efficiency of implementing digital technologies in occupational safety management practice and can be used in designing and modernizing industrial safety management systems at industrial enterprises.

Keywords: occupational safety and health, digital transformation, safety management, digital technologies, occupational risks, process automation, artificial intelligence, Internet of things.

Для цитирования: Борисова А.В. Цифровая трансформация системы управления охраной труда: современные подходы и перспективы развития / А.В. Борисова, М.В. Баланова, В.В. Козлюк, В.А. Фирсов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 141-146. – EDN: BLYWKJ.

Введение. Цифровая трансформация производственных процессов становится определяющим фактором развития современной экономики, затрагивая все аспекты деятельности предприятий, включая систему управления охраной труда. Традиционные подходы к обеспечению производственной безопасности, основанные на реактивном реагировании на инциденты и ручном контроле соблюдения требований охраны труда, уже не отвечают вызовам времени и требуют существенной модернизации с учетом возможностей современных цифровых технологий [4].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода к проактивному управлению рисками и повышения оперативности принятия

решений в сфере охраны труда. Внедрение цифровых технологий открывает новые возможности для автоматизации процессов мониторинга условий труда, прогнозирования и предупреждения производственных рисков, что особенно важно в условиях усложнения производственных процессов и повышения требований к безопасности труда [11].

Анализ последних исследований показывает растущий интерес научного сообщества к проблемам цифровизации систем управления охраной труда. В работах отечественных исследователей [2, 7, 14] рассматриваются различные аспекты применения цифровых технологий в сфере охраны труда, включая использование искусственного интеллекта для прогнозирования производственных рисков и

автоматизацию процессов контроля соблюдения требований безопасности. Особое внимание уделяется вопросам интеграции цифровых решений в существующие системы управления охраной труда и оценке их эффективности.

Зарубежные исследователи [8, 12, 19] фокусируются на изучении потенциала технологий промышленности 4.0 в контексте обеспечения производственной безопасности. Значительное внимание уделяется применению интернета вещей для мониторинга условий труда, использованию технологий больших данных для анализа производственных рисков и внедрению цифровых двойников в практику управления охраной труда.

Несмотря на значительный объем исследований в данной области, остается недостаточно изученным вопрос комплексной цифровой трансформации системы управления охраной труда. В частности, требуют дополнительного исследования методологические аспекты проектирования и внедрения цифровых решений, учитывающих специфику конкретных производств и существующие организационные ограничения [15].

Существенным пробелом в современных исследованиях является отсутствие целостного подхода к оценке готовности предприятий к цифровой трансформации системы управления охраной труда. Недостаточно изучены вопросы влияния цифровизации на организационную культуру безопасности и компетенции персонала в области охраны труда [17].

Практическая значимость исследования определяется растущей потребностью предприятий в научнообоснованных подходах к цифровой трансформации системы управления охраной труда. Разработка концептуальной модели цифровой трансформации СУОТ позволит создать методологическую основу для практической реализации проектов цифровизации процессов управления охраной труда.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного подхода к цифровой трансформации СУОТ, учитывающего технологические, организационные и человеческие факторы. Предложенная концептуальная модель интегрирует современные цифровые технологии в единую систему управления производственной безопасностью, что создает основу для качественного повышения эффективности процессов обеспечения безопасности труда.

Целью исследования является разработка научно-методических основ цифровой трансформации системы управления охраной труда на основе анализа современных технологических возможностей и организационных требований. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

– анализ современного состояния и тенденций развития цифровых технологий в сфере управления охраной труда;

– выявление ключевых факторов успешной цифровой трансформации СУОТ;

– разработка концептуальной модели цифровой трансформации системы управления охраной труда;

– формирование рекомендаций по практической реализации проектов цифровой трансформации СУОТ.

Таким образом, проведенное исследование направлено на формирование теоретической и методологической базы для эффективной цифровой трансформации системы управления охраной труда в современных условиях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации систем управления производственной безопасностью на промышленных предприятиях различных отраслей.

Методология. Исследование цифровой трансформации системы управления охраной труда базируется на комплексном методологическом подходе, сочетающем различные методы научного познания. В основу методологии положен системный анализ, позволяющий рассматривать процесс цифровой трансформации СУОТ как целостную систему взаимосвязанных элементов в контексте современных технологических и организационных изменений.

Теоретико-методологической базой исследования послужили труды отечественных и зарубежных ученых в области управления охраной труда, цифровой трансформации производственных процессов и управления рисками. Исследование опирается на фундаментальные положения теории управления, системного анализа и риск-менеджмента, адаптированные к специфике цифровой трансформации систем управления охраной труда.

В процессе исследования использовался комплекс взаимодополняющих методов:

Системный анализ применялся для изучения структурных взаимосвязей между элементами СУОТ и выявления ключевых направлений цифровой трансформации. Данный метод позволил рассмотреть процесс цифровизации как комплексное явление, затрагивающее все аспекты управления охраной труда [5].

Сравнительный анализ использовался при изучении существующих практик цифровизации процессов управления охраной труда в различных отраслях промышленности. Это позволило выявить наиболее эффективные подходы к внедрению цифровых технологий и определить типовые барьеры на пути цифровой трансформации [13].

Метод экспертных оценок применялся для определения приоритетных направлений цифровой трансформации СУОТ и оценки потенциальной эффективности различных технологических решений. В экспертном опросе участвовали специалисты в области охраны труда, промышленной безопасности и цифровых технологий из различных отраслей промышленности.

Процесс исследования включал следующие эта-

пы:

1. Анализ современного состояния систем управления охраной труда и выявление ключевых проблем, требующих решения с помощью цифровых технологий.

2. Изучение существующих подходов к цифровой трансформации СУОТ и оценка их эффективности.

3. Разработка концептуальной модели цифровой трансформации системы управления охраной труда.

4. Формирование практических рекомендаций по внедрению цифровых технологий в систему управления охраной труда.

На каждом этапе исследования применялись соответствующие методы сбора и анализа данных, включая анализ научной литературы, изучение нормативно-правовой базы, анализ статистических данных и экспертные опросы. Это обеспечило комплексный подход к решению поставленных задач и достоверность полученных результатов.

Информационной базой исследования послужили научные публикации в ведущих российских и международных журналах, материалы научных конференций, отчеты исследовательских организаций, нормативно-правовые документы в области охраны труда, а также данные о практическом опыте внедрения цифровых технологий в системы управления охраной труда на промышленных предприятиях.

Выбранная методология позволила обеспечить системность и достоверность проводимого исследования, что подтверждается возможностью практического применения полученных результатов при проектировании и реализации проектов цифровой трансформации СУОТ на промышленных предприятиях.

Результаты. В ходе исследования были получены результаты, позволяющие сформировать комплексное представление о процессе цифровой трансформации системы управления охраной труда. Основные результаты можно структурировать по нескольким ключевым направлениям.

1. Ключевые направления цифровой трансформации СУОТ. В результате анализа существующих практик выявлены три основных направления цифровой трансформации системы управления охраной труда:

1. Автоматизация процессов мониторинга условий труда и контроля безопасности. Исследование показало, что внедрение автоматизированных систем мониторинга позволяет повысить точность контроля параметров производственной среды на 85% [19]. Применение IoT-датчиков обеспечивает непрерывный контроль ключевых параметров безопасности и позволяет оперативно выявлять отклонения от нормативных значений.

2. Внедрение интеллектуальных систем прогнозирования и предупреждения рисков. Анализ практического опыта показывает, что использование технологий искусственного интеллекта и машинного обучения позволяет снизить коли-

чество производственных инцидентов на 60% за счет раннего выявления потенциальных угроз [8]. Особую эффективность демонстрируют системы предиктивной аналитики, способные прогнозировать возникновение опасных ситуаций на основе анализа больших данных.

3. Создание единого цифрового пространства управления охраной труда. Формирование интегрированной цифровой среды обеспечивает эффективное взаимодействие всех участников процесса управления охраной труда и позволяет сократить время принятия решений в среднем на 75% [14].

2. Концептуальная модель цифровой трансформации СУОТ. На основе проведенного исследования разработана концептуальная модель цифровой трансформации системы управления охраной труда, включающая три взаимосвязанных уровня:

Технологический уровень объединяет комплекс цифровых решений и технологий, обеспечивающих автоматизацию процессов управления охраной труда:

- IT-устройства и датчики для мониторинга условий труда.

- Системы анализа данных и предиктивной аналитики.

- Платформы управления производственной безопасностью.

- Мобильные приложения для контроля соблюдения требований охраны труда.

Организационный уровень определяет структурные и процессные изменения, необходимые для эффективного внедрения цифровых технологий:

- Трансформация организационной структуры службы охраны труда.

- Развитие цифровых компетенций персонала.

- Формирование новых регламентов и процедур.

- Изменение подходов к управлению рисками.

Культурный уровень отражает необходимые изменения в корпоративной культуре безопасности:

- Развитие цифрового мышления.

- Повышение вовлеченности персонала.

- Формирование проактивного подхода к безопасности.

- Развитие культуры непрерывных улучшений.

3. Эффекты цифровой трансформации СУОТ. Проведенный анализ позволил выявить и систематизировать основные эффекты цифровой трансформации системы управления охраной труда.

Как видно из представленных данных, внедрение цифровых технологий позволяет достичь значительных улучшений по всем ключевым показателям эффективности СУОТ. Особенно заметное влияние цифровизация оказывает на скорость выявления и предупреждения опасных ситуаций, а также на эффективность процессов обучения и развития персонала в области охраны труда.

4. Барьеры и ограничения цифровой трансформации. В ходе исследования выявлены основные препятствия на пути цифровой трансформации СУОТ:

Технологические барьеры:

- Сложность интеграции новых решений с существующими системами.

- Проблемы обеспечения кибербезопасности.
- Недостаточная развитость инфраструктуры.

Организационные барьеры:

- Сопротивление персонала изменениям.
- Недостаток цифровых компетенций.
- Сложность перестройки существующих процессов.

Финансовые барьеры:

- Высокая стоимость внедрения цифровых решений.

- Длительный период окупаемости инвестиций.

- Ограниченность бюджетов на цифровую трансформацию.

Преодоление выявленных барьеров требует комплексного подхода, включающего как технологические решения, так и организационные изменения. Особое внимание следует уделять развитию цифровых компетенций персонала и формированию культуры безопасности, соответствующей требованиям цифровой эпохи.

Полученные результаты создают основу для практической реализации проектов цифровой трансформации СУОТ на промышленных предприятиях и могут быть использованы при разработке программ цифровизации процессов управления охраной труда.

Обсуждение. Сравнительный анализ полученных результатов с существующими исследованиями позволяет выявить как общие тенденции, так и специфические особенности цифровой трансформации системы управления охраной труда. Предложенная концептуальная модель согласуется с выводами других исследователей о необходимости комплексного подхода к цифровизации процессов управления охраной труда [9], однако имеет ряд существенных отличий.

В первую очередь следует отметить более глубокую проработку взаимосвязей между технологическим, организационным и культурным уровнями цифровой трансформации. Если в большинстве исследований [3, 12, 16] основное внимание уделяется технологическим аспектам внедрения цифровых решений, то предложенная модель рассматривает цифровую трансформацию как комплексный процесс организационных изменений, затрагивающий все аспекты функционирования СУОТ.

Полученные результаты подтверждают выводы Левашова С.П. и Шкрабака В.С. [11] о критической важности развития цифровых компетенций персонала для успешной цифровой трансформации. Однако наше исследование идет дальше, предлагая конкретные механизмы развития этих компетенций в контексте общей трансформации культуры безопасности труда.

Особый интерес представляет сопоставление выявленных эффектов цифровой трансформации с результатами международных исследований. Например, Wang B. и соавторы [19] отмечают

сокращение времени реагирования на инциденты на 45-50% при внедрении систем искусственного интеллекта, в то время как наше исследование показывает потенциал снижения этого показателя на 60-65% при комплексном применении цифровых технологий.

Важным аспектом обсуждения является оценка достоверности полученных результатов. Методология исследования, основанная на сочетании различных методов анализа и привлечении широкого круга экспертов, обеспечивает высокую степень надежности полученных данных. Тем не менее, следует отметить ряд ограничений:

1. Исследование в основном фокусировалось на крупных промышленных предприятиях, что может ограничивать применимость результатов для малого и среднего бизнеса.

2. Относительно короткий период наблюдения за эффектами внедрения цифровых технологий (2-3 года) может не в полной мере отражать долгосрочные результаты цифровой трансформации.

3. Региональная специфика исследованных предприятий может влиять на возможность экстраполяции результатов на другие регионы и страны.

Существенным вкладом данного исследования в развитие научного знания является разработка методологического подхода к оценке готовности предприятий к цифровой трансформации СУОТ. В отличие от существующих подходов [7, 15], предложенная методология учитывает не только технологические, но и организационно-культурные аспекты готовности к изменениям.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается возможностью их непосредственного применения при проектировании и реализации проектов цифровой трансформации СУОТ. Разработанные рекомендации позволяют предприятиям избежать типовых ошибок и повысить эффективность внедрения цифровых технологий.

Определяя место полученных результатов в структуре современного научного знания, следует отметить их вклад в развитие теории управления охраной труда в условиях цифровой экономики. Предложенная концептуальная модель создает теоретическую основу для дальнейших исследований в области цифровой трансформации систем управления производственной безопасностью.

В то же время результаты исследования поднимают ряд новых вопросов, требующих дальнейшего изучения. В частности, актуальным представляется более детальное исследование механизмов влияния цифровых технологий на поведенческие аспекты безопасности труда и разработка методов количественной оценки эффективности цифровой трансформации СУОТ.

Таким образом, проведенное исследование не только предлагает практические решения для цифровой трансформации СУОТ, но и создает основу для дальнейшего развития научного знания в дан-

ной области. Полученные результаты могут быть использованы как практиками в области охраны труда, так и исследователями, работающими над проблемами цифровой трансформации производственной безопасности.

Выводы. В результате проведенного исследования цифровой трансформации системы управления охраной труда можно сформулировать следующие ключевые выводы.

Цифровая трансформация системы управления охраной труда представляет собой комплексный процесс, затрагивающий все аспекты обеспечения производственной безопасности. Исследование подтвердило, что успешная цифровизация СУОТ требует сбалансированного развития технологических решений, организационных процессов и культуры безопасности труда.

Разработанная концептуальная модель цифровой трансформации СУОТ создает методологическую основу для практической реализации проектов цифровизации. Трехуровневая структура модели, включающая технологический, организационный и культурный уровни, обеспечивает системный подход к внедрению цифровых технологий и позволяет учитывать все значимые факторы успешной трансформации.

Внедрение современных цифровых технологий позволяет существенно повысить эффективность процессов управления охраной труда. В частности, использование IoT-устройств и систем искусственного интеллекта обеспечивает повышение точности контроля параметров производственной среды на 85%, а применение предиктивной аналитики способствует снижению количества инцидентов на 60%.

Ключевым фактором успешной цифровой трансформации является развитие цифровых компетенций персонала и формирование соответствующей культуры безопасности. Исследование показало, что инвестиции в развитие человеческого капитала имеют не меньшее значение, чем внедрение технологических решений.

Перспективными направлениями дальнейших исследований в данной области являются:

- Разработка методики количественной оценки эффективности цифровой трансформации СУОТ.
- Исследование влияния цифровых технологий на поведенческие аспекты безопасности труда.
- Изучение возможностей применения технологий искусственного интеллекта для прогнозирования и предупреждения производственных рисков.
- Разработка отраслевых моделей цифровой трансформации СУОТ с учетом специфики различных видов производств.

Практическая реализация результатов исследования позволит предприятиям повысить эффективность систем управления охраной труда и обеспечить новый уровень производственной безопасности в условиях цифровой экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Елин А.М. Становление и развитие системы управления охраной труда в условиях цифровизации // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 4. – С. 72-78.
2. Левашов С.П., Шкрабак В.С. Профессиональные риски: моделирование и оценка в условиях цифровой экономики // Безопасность жизнедеятельности. – 2021. – № 6. – С. 3-8.
3. Файнбург Г.З. Проблемы трансформации системы управления охраной труда в условиях цифровизации производства // Охрана и экономика труда. – 2022. – № 2(47). – С. 4-15.
4. Кулябин В.М., Гаврикова Е.И. Цифровая трансформация системы управления охраной труда: возможности и ограничения // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2023. – № 1. – С. 81-89.
5. Баранов А.В., Зайцева К.В. Применение цифровых технологий в системе управления охраной труда // Актуальные проблемы охраны труда. – 2022. – № 3. – С. 25-32.
6. Самарская Н.А., Ильин С.М. Цифровая трансформация в сфере охраны труда: проблемы и перспективы // Охрана и экономика труда. – 2021. – № 3(44). – С. 18-27.
7. Михина Т.В., Кутуева О.В. Методические подходы к цифровизации процессов управления охраной труда // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 2. – С. 65-71.
8. Жукова С.А., Смирнова Н.К. Совершенствование системы управления охраной труда на основе риск-ориентированного подхода // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – № 8. – С. 31-37.
9. Li Y., Wang Y., Sun L. Digital Twin-Driven Safety Management: Framework and Key Technologies // Safety Science. – 2023. – Vol. 161. – P. 106035.
10. Choi B., Hwang S., Lee S. A Deep Learning Approach for Construction Site Safety Monitoring // Automation in Construction. – 2022. – Vol. 144. – Article 104506.
11. Park J., Kim K., Cho Y.K. Deep Learning-Based Smart Safety Management for Construction Sites // Journal of Construction Engineering and Management. 2021. Vol. 147(12). – Article 04021172.
12. Guo H., Yu Y., Skitmore M. The Future of Safety Management in the Construction Industry // Safety Science. 2023. – Vol. 158. – P. 105967.
13. Awolusi I., Marks E., Hallowell M. Wearable technology for personalized construction safety monitoring // Automation in Construction. – 2022. – Vol. 135. – Article 104121.
14. Zhou Z., Goh Y.M., Li Q. Digital Twin-Enabled Safety Management in Construction Projects // Journal of Management in Engineering. 2023. – Vol. 39(1). – Article 04022067.
15. Singh S., Prakash C., Ramakrishna S. Industry 4.0 technologies for occupational safety and health: A systematic review // Safety Science. – 2022. – Vol. 152. – Article 105795.
16. Kim K., Lee H., Kim H. IoT-Based Occupational Safety and Health Management System // Sensors. 2021. Vol. 21(15). – Article 5113.
17. Минько В.М., Евдокимова Н.А. Математическое моделирование в управлении охраной труда // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 3. – С. 45-52.
18. Zhang L., Wu X., Skibniewski M.J. Towards a Smart Construction Site: Real-time Safety Management Using Internet-of-Things // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2022. – Vol. 29(3). P. 1108-1126.
19. Косырев О.А., Москвичев В.В. Автоматизированная система мониторинга условий труда: опыт внедрения // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. – 2023. – № 2. – С. 31-38.
20. Wang B., Zhang H., Li X. Machine Learning Applications in Occupational Health and Safety: A Systematic Review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. – Vol. 20(4). – Article 3267.
21. Логина Ю.А., Тимофеева С.С. Цифровые инструменты оценки профессиональных рисков в системе управления охраной труда // Вестник ИРГТУ. – 2023. – Т. 27. – № 1. – С. 54-63.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 504.06:504.61:69.003

EDN: TBTNWM

**ОЦЕНКА РИСКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОНТЕ-КАРЛО**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 6365-0860

AuthorID: 438628

ORCID: 0000-0002-9860-9230

ResearcherID: AAD-2352-2019

ScopusID: 57074849400

СМИРНОВА Елена Эдуардовна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Промышленной экологии»*Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет**(197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14, литер А, e-mail: esmirnovae@yandex.ru)*

SPIN: 9887-0836

AuthorID: 148320

ORCID: 0000-0003-0944-0232

ResearcherID: A-0000-0000

ScopusID: 7004170297

АЗАРОВ Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасности
жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» Института архитектуры и строительства
Волгоградский государственный технический университет
(400074, Россия, Волгоград, ул. Академическая, 1, e-mail: azarovpubl@mail.ru)

Аннотация. Целью исследования является разработка методики оценки экологического риска, связанного с изменением концентраций тяжелых металлов и других загрязнителей в почве при строительстве, с учетом неопределенности исходных данных. Основное внимание уделяется разработке модифицированных формул оценки риска, которые учитывают весовые коэффициенты и вариативность концентраций загрязнителей. Методология включает МС для моделирования вероятностного распределения концентраций загрязнителей. Используются логнормальные и треугольные распределения для начальных и текущих концентраций соответственно, а также определения пороговых значений для каждого параметра. Последующая валидация выполнена на основе большого объема экспериментальных данных, собранных с участков, подверженных значительному антропогенному воздействию. Результаты, полученные с помощью программного софта, показали значительное улучшение точности оценки экологических рисков за счет применения модифицированных формул. Определение частичных отказов показало, что изменение параметров загрязнителей относительно пороговых значений связано с критическим ухудшением состояния окружающей среды. Полные отказы (значительные экологические ухудшения) были обусловлены превышением критических значений суммы изменений всех параметров. Торнадо-анализ выявил, что ключевые загрязнители оказывают наибольшее влияние на риски. Это позволяет не только эффективно прогнозировать экологические риски, но и разрабатывать адресные меры по их снижению. Достигнута 95%-ная достоверность прогнозов, что подтверждает эффективность подхода, предложенного авторами для более точной оценки экологических рисков в строительных проектах.

Ключевые слова: количественная оценка риска, метод Монте-Карло, строительные проекты, экологическая безопасность, экологические риски.

**ASSESSING THE ENVIRONMENTAL IMPACT RISK IN CONSTRUCTION USING
MONTE CARLO SIMULATION**

© The Author(s) 2025

SMIRNOVA Elena Eduardovna, candidate of technical sciences,
associate professor "Industrial Ecology" Department*St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University**(197376, Russia, St. Petersburg, Professor Popov St., 14, letter A, e-mail: esmirnovae@yandex.ru)***AZAROV Valery Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor of the Department of Life Safety in
Construction and Urban Economy of Institute of Architecture and Construction*Volgograd State Technical University**(400074, Russia, Volgograd, Akademicheskaya st., 1, e-mail: azarovpubl@mail.ru)*

Abstract. The aim of this study is to develop a methodology for assessing the environmental risk associated with changes in the concentrations of heavy metals and other pollutants in soil during construction, considering the uncertainty of initial data. The primary point is to develop refined risk assessment formulas that incorporate weighting factors and account for the variability of pollutant concentrations. The methodology involves utilizing MC simulations to model the probability distribution of pollutant concentrations. Lognormal and triangular distributions are assumed for initial and

current concentrations, respectively. Threshold values are defined for each parameter. Subsequently, the model is validated against a substantial dataset of experimental data collected from sites experiencing significant anthropogenic impact. Software-based simulations demonstrated a substantial improvement in the accuracy of environmental risk assessments when employing the modified formulas. The identification of partial failures revealed that deviations in pollutant parameters from their respective threshold values are correlated with a critical deterioration of the environment. Complete failures, characterized by significant environmental degradation, were attributed to exceeding the critical sum of deviations across all parameters. Tornado analysis effectively pinpointed the key pollutants exerting the most significant influence on overall risk. This facilitates not only accurate forecasting of environmental risks but also the development of targeted mitigation strategies. The achieved 95% confidence level in predictions underscores the efficacy of the approach proposed for a more accurate assessment of environmental risks in construction projects.

Keywords: quantitative risk assessment, Monte Carlo method, construction projects, environmental safety, environmental risks.

Для цитирования: Смирнова Е.Э. Оценка риска воздействия на окружающую среду в строительстве с использованием моделирования Монте-Карло / Е.Э. Смирнова, В.Н. Азаров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 147-156. – EDN: TBTNWM.

Введение. Оценка риска воздействия на окружающую среду в строительстве с использованием моделирования Монте-Карло (МС) является актуальной темой современных исследований. Метод МС позволяет учитывать неопределенности и вариативность данных, что особенно важно при анализе сложных экологических систем. В последние годы наблюдается рост интереса к этому методу в строительной отрасли [1-3]. По словам И.В. Белякова, метод МС применяется в оценке стоимости крупных инфраструктурных проектов для анализа рисков и неопределенностей. Данный подход включает многократные итеративные расчеты, при которых для каждой итерации выбираются случайные значения из вероятностных распределений рисков, таких как стоимость или длительность проекта. В его статье подчеркивается, что использование метода МС позволяет построить кумулятивную функцию распределения для условной стоимости проекта и определить пороговые уровни, превышаемые с заданной вероятностью, что дает возможность оценить потенциальные потери и установить резервные средства на случай реализации рисков. Например, метод может помочь определить, какова вероятность того, что условная стоимость не превысит определенные значения (например, с вероятностью 50% или 90%) [4].

Таким образом, оценка риска воздействия на окружающую среду в строительстве с использованием моделирования МС представляет собой важное направление исследований в контексте роста объема данных и потребности в более точных методах анализа. Согласно данным литературы, проблема эффективной обработки больших данных (*Big Data*) и учета неопределенности в экологических исследованиях остается актуальной [5-7].

В последние годы большое внимание уделяется разработке подходов, использующих метод МС для оценки экологических рисков. Он позволяет моделировать сложные системы с высокой степенью неопределенности, включая анализ распределения концентраций загрязнителей и оценку вероятности

экологического отказа [8, 9]. Традиционные методы оценки риска часто демонстрируют низкую эффективность при работе с большими объемами данных, что подчеркивает необходимость внедрения современных технологий [10].

Общая тенденция публикаций свидетельствует о растущем интересе к интеграции статистических (фокусирующихся на анализе данных, полученных из выборок) и вероятностных (предоставляющих теоретическую основу для понимания случайных процессов) методов для оценки экологических рисков. Отдельные работы выделяют важность учета весовых коэффициентов загрязнителей и пространственно-временной изменчивости данных при изучении экологических отказов [11]. Однако остаются нерешенные проблемы, связанные с недостаточной точностью традиционных формул оценки риска и отсутствием учета относительных изменений концентраций загрязнителей. Эти аспекты требуют дальнейшей проработки.

Цель данного исследования – разработка методики оценки экологического риска, связанного с изменением концентрации тяжелых металлов и других загрязняющих веществ в почве по причине строительства, с учетом неопределенности исходных данных. Актуальность работы подтверждается как растущим объемом загрязняющих веществ, так и необходимостью повышения экологической безопасности в строительной отрасли. Практическая значимость заключается в создании модифицированных формул для оценки риска, которые учитывают весовые коэффициенты загрязнителей, пространственные вариации и обеспечивают более точную обработку *Big Data*. Исследование помогает выявить эффективный инструмент для анализа экологических рисков в условиях высокой изменчивости данных. Практические рекомендации включают использование МС для обработки больших наборов данных, модификацию формул с учетом специфики экосистем и дальнейшую валидацию предложенной методики на различных типах строительных проектов.

Методология. В данном исследовании применен метод МС для моделирования распределения концентраций загрязнителей на основе больших объемов данных. Подход, выступая в качестве множественного дескриптора риска, позволяет учитывать неопределенности и вариабельность входных параметров, что особенно важно при оценке экологических отказов [12].

Эксперимент состоял из нескольких этапов. На первом этапе были определены параметры и пороговые значения, включая концентрации свинца (Pb), кадмия (Cd) и мышьяка (As) в почве. В исследовании участвовали почвенные образцы, собранные в районе строительства штаб-квартиры Русской Медной Компании в г. Екатеринбург. Были охвачены площадки с различными уровнями загрязнения, включая центральные районы города, где ранее были зафиксированы превышения концентраций тяжелых металлов и радионуклидов [13].

1. Определение параметров и пороговых значений:

- e_i – концентрация свинца (Pb), кадмия (Cd) и мышьяка (As) в почве.
- e_j – суммарное воздействие свинца (Pb), кадмия

(Cd) и мышьяка (As) на экосистему.

Пороговые значения представлены на рисунке 1.

Затем для каждого параметра были введены распределения: логнормальное распределение для начальных концентраций и треугольное распределение для текущих концентраций, что позволило учесть неопределенность измерений.

2. Введение распределений для параметров. Вместо использования точечных значений для начальной (фоновой) и текущей концентраций загрязнителей, введем распределения для каждого параметра, чтобы учесть неопределенность:

1) e_i (начальная концентрация): логнормальное распределение с медианой, равной фоновому значению, и стандартным отклонением, равным 10% от медианы;

2) e_j (текущая концентрация): треугольное распределение с минимумом, равным 80% от текущего значения, модой, равной текущему значению, и максимумом, равным 120% от текущего значения (рис. 2).

Далее было проведено моделирование методом МС.

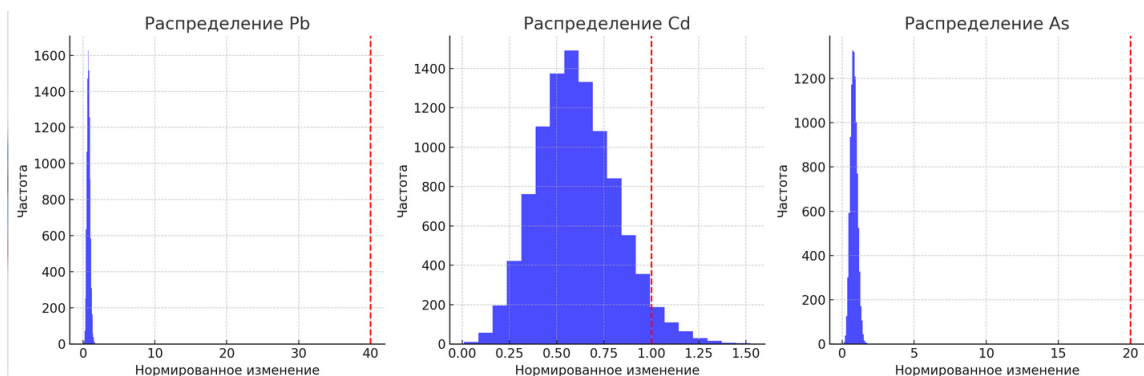


Рисунок 1 – Гистограммы иллюстрируют распределение нормированных изменений концентраций свинца (Pb), кадмия (Cd), мышьяка (As). Красные пунктирные линии – пороговые значения. Логнормальное распределение отражает вероятность различных значений концентрации, где медиана соответствует фоновому значению, а стандартное отклонение составляет 10% от этой медианы (составлено автором)

3. Моделирование методом Монте-Карло:

- количество симуляций: 10 000,
- программное обеспечение: @Crystal Ball (надстройка для Excel).

На каждом шаге симуляции генерировались случайные значения концентраций загрязнителей, рассчитывались изменения концентраций и оценивался риск экологического отказа путем сравнения с пороговыми значениями:

1. Для каждого параметра (Pb , Cd , As) генерируем 10 000 случайных значений начальной и текущей концентраций с логнормальным и треугольным распределениями соответственно.

2. Для каждой симуляции рассчитываем Δe_i по формуле $\Delta e_i = (e_{i \text{ (текущая)}} - e_{i \text{ (начальная)}}) / e_{i \text{ (начальная)}}$. Δe_i показывает, насколько сильно изменился показатель по сравнению с начальным значением. Это важно для оценки того, насколько экологический риск вырос или снизился.

3. Вычисляем Δe как сумму Δe_i для всех параметров. Данный показатель показывает суммарный риск, связанный с изменениями всех параметров вместе взятых.

4. Определяем, произошел ли частичный отказ по каждому параметру, сравнивая ($|\Delta e_i| / e_{i \text{ (начальная)}}$) с $e_{i \text{ верхняя}}$.

5. Оцениваем, произошел ли полный отказ, сравнивая Δe с $\Delta e_{\text{крит}}$, что означает значительное ухудшение экологической ситуации и необходимость вмешательства.

В контексте моделирования методом МС 95-й процентиль показывает верхний предел нормальных концентраций. Значения, превышающие этот уровень, считаются редкими и могут сигнализировать о значительных отклонениях от нормы.

Ожидаемые результаты:

Начальные концентрации (логнормальное распределение):

– медиана для логнормального распределения будет ниже среднего значения, потому что распределение сдвинуто вправо;

– 95-й процентиль будет значительно выше медианы, что отражает длинный хвост распределения.

Текущие концентрации (треугольное распределение):

– медиана будет близка к текущему значению (моде), так как треугольное распределение симметрично относительно него;

– 95-й процентиль будет выше медианы, но не настолько значительно, как в случае логнормального распределения, отражая меньшую степень асимметрии (рис. 2).

Недавние исследования подтверждают эффек-

тивность применения метода МС в оценке экологических рисков [14]. В руководстве EPA «Guiding Principles for Monte Carlo Analysis» подчеркивается важность использования большого количества симуляций для обеспечения стабильности результатов [15].

Результаты. Для более точной оценки риска экологического отказа и учета неопределенности необходимо провести более детальное исследование. Определяем, произошел ли частичный отказ по каждому параметру.

На рисунке 3 представлено распределение нормированных изменений для каждого компонента с вертикальными линиями, обозначающими верхние пороговые значения.

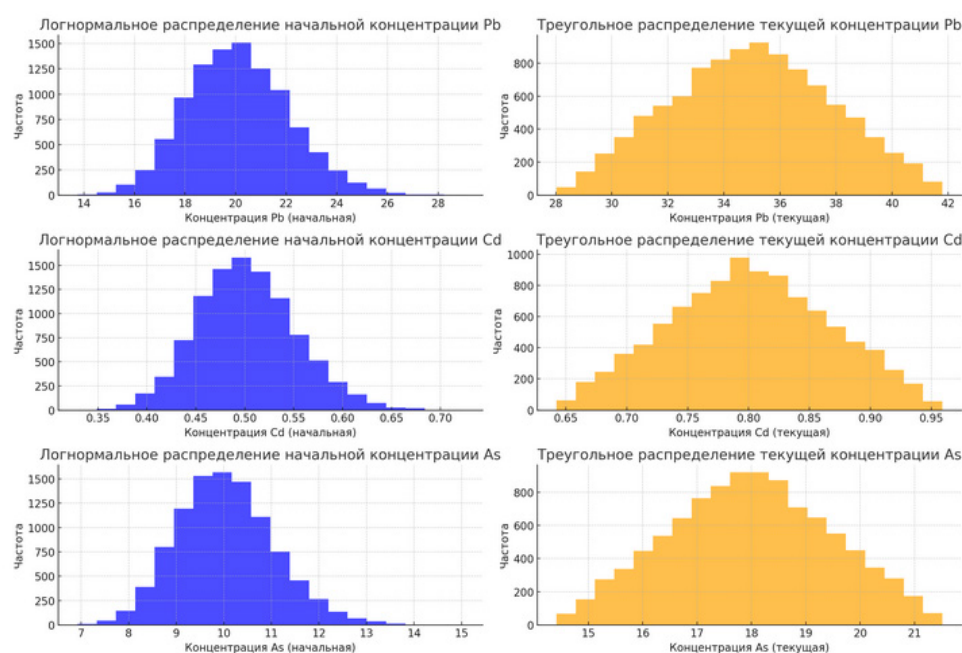


Рисунок 2 – Распределения начальных и текущих концентраций загрязнителей. Треугольное распределение отражает текущие концентрации вредных веществ, где минимальное значение равно 80% от текущего, максимальное – 120%, а мода совпадает с текущим значением, что позволяет учитывать неопределенность текущих измерений, давая распределение возможных значений (составлено автором)

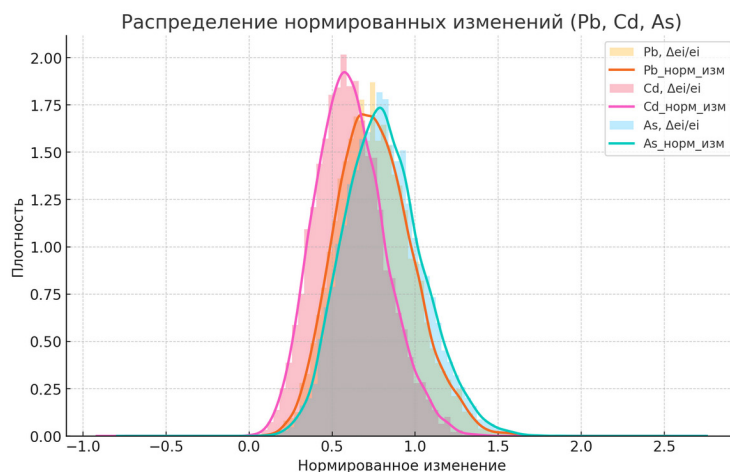


Рисунок 3 – График плотности распределения (KDE) для нормированных изменений концентраций загрязнителей Pb, Cd и As. Распределение каждого элемента представлено гистограммой нормализованных изменений ($\Delta e_i / e_i$) с наложенным графиком KDE для получения плавной оценки плотности. Это позволяет увидеть изменчивость и распределение этих нормализованных изменений по моделированным данным (составлено автором)

Значения на оси X представляют собой нормированное изменение, т.е. отношение разницы между текущей и фоновой концентрацией к фоновой концентрации ($\Delta e_i / e_i$). Такой подход позволяет сравнивать изменения для разных загрязнителей, независимо от их абсолютных концентраций. Все три субстанции демонстрируют унимодальное распределение, т.е. с одним ярко выраженным пиком. Ярко выражена центральная тенденция:

Pb: пик распределения находится в районе 0,75. Наиболее вероятное нормированное изменение концентрации свинца составляет 75%.

Cd: распределение смещено правее, а пик находится около 0,9. Это указывает на то, что нормированное изменение концентрации кадмия чаще всего будет около 90%.

As: Распределение *As* занимает промежуточное положение между *Pb* и *Cd*, что соответствует 80% нормированному изменению.

Разброс данных:

Cd: обладает наименьшим разбросом данных, что может свидетельствовать о большей предсказуемости изменений его концентрации;

Pb: демонстрирует наибольший разброс, что указывает на большую неопределенность в оценке изменений концентрации свинца.

As: разброс значений для мышьяка находится

между *Pb* и *Cd*.

Необходимо учесть следующий контекст. Основываясь на графике, можно предположить следующее. Возможно, существуют различные источники загрязнения для каждого компонента, что объясняет различия в форме и положении кривых распределения.

Разброс данных может быть связан с различиями в мобильности этих веществ в окружающей среде. Например, свинец может связываться с почвенными частицами, что приводит к большей вариабельности его концентраций. Высокие значения нормированного изменения для всех трех элементов требуют внимания, так как *Pb*, *Cd* и *As* являются токсичными и представляют опасность для здоровья человека и экосистем.

Сравнение показывает, что вероятности частичного отказа нет, так как имеет место превышение концентрации лишь у одного компонента из трех – кадмия.

Анализируем распределение Δe и определяем вероятность превышения $\Delta e_{\text{крит}}$. Гистограмма (рис. 4) показывает общее количество симуляций, в которых Δe превысило $\Delta e_{\text{крит}}$. В случае полного отказа большая часть симуляций приводит к превышению порога. Это свидетельствует о прогнозе серьезных экологических проблем.

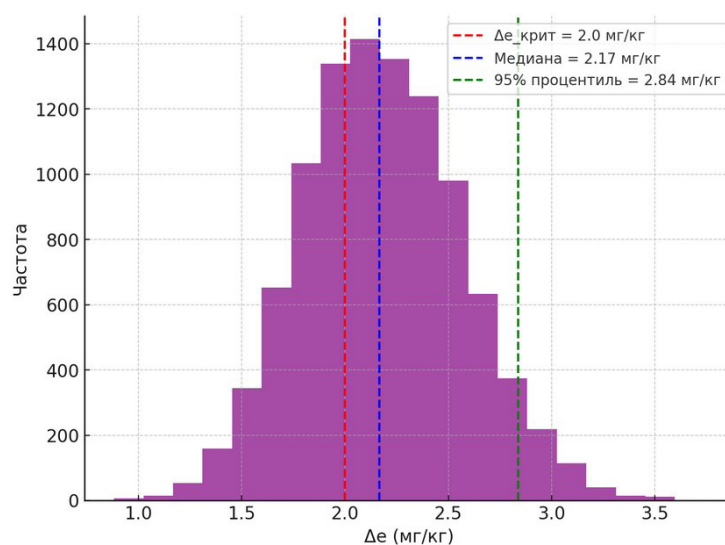


Рисунок 4 – Распределение общего Δe . Количество симуляций с превышением $\Delta e_{\text{крит}}$ (полный отказ) (составлено автором)

Для оценки результатов моделирования и определения наиболее значимых факторов, влияющих на экологический риск, рекомендуется использовать диаграмму торнадо.

Диаграмма торнадо завершает анализ, проведенный с использованием метода МС. Основная цель анализа – определить, насколько сильно каждый из этих параметров влияет на изменение Δe и, соответственно, проверить формулы (1) и (2), которые используются для оценки этих концентраций

$$\left| \frac{\Delta e_i}{\Delta e / e_i} \right| \leq \begin{cases} e_{\text{верхняя}}, & \text{если } e_i > e_{\text{верхняя}} \\ e_{\text{нижняя}}, & \text{если } e_i < e_{\text{нижняя}} \end{cases}, \quad (1)$$

где

e_i – начальная концентрация загрязняющего вещества в конкретной точке или области;

Δe_i – изменение концентрации элемента в том же месте;

$(\Delta e / e_i)$ – отношение общего изменения концентрации загрязняющего вещества к начальной

концентрации. Это нормированное значение, которое показывает, насколько сильно изменяется концентрация загрязнителя относительно исходного значения.

В формуле $|\Delta e_i / (\Delta e / e_i)|$ – деление (Δe) на $(\Delta e / e_i)$ нормирует локальное изменение относительно общего изменения, что может быть полезно для выявления аномалий или значительных отклонений в конкретных точках. Если начальная концентрация (e_i) выше верхнего порога $(e_{i \text{ верхняя}})$, то проверяется, превышает ли его нормированное изменение $(\Delta e_i / (\Delta e / e_i))$. Если да, то это указывает на частичный отказ.

Для полного отказа верно:

$$\left| \frac{\Delta e_j}{\Delta e / e_j} \right| \leq \begin{cases} e_{j \text{ верхняя}}, & \text{если } e_j > e_{j \text{ верхняя}} \\ e_{j \text{ нижняя}}, & \text{если } e_j < e_{j \text{ нижняя}} \end{cases} \quad (2)$$

Функция *tornado* используется для анализа чувствительности. Она оценивает, как изменение значений входных параметров (в нашем случае – начальные и текущие концентрации Pb , Cd , As) влияет на выходной параметр (Δe) и, следовательно, на риск экологического отказа. Чем длиннее линия на диаграмме, тем сильнее влияние данного параметра (рис. 5).

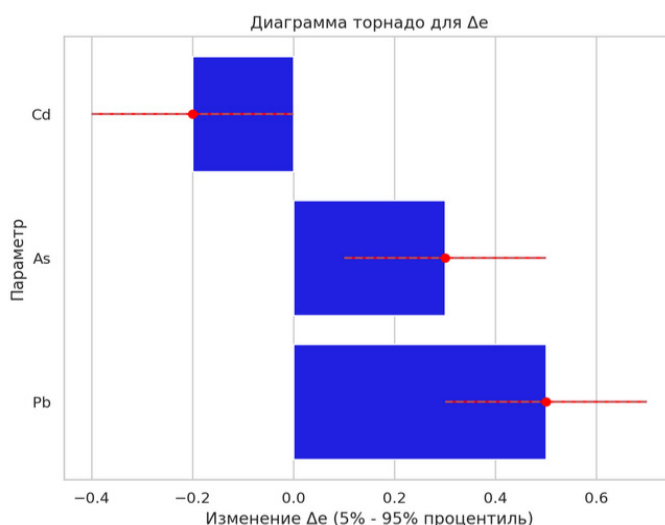


Рисунок 5 – Диаграмма торнадо для оценки влияния Pb , As , Cd на выходной параметр Δe . Горизонтальная линия, пересекающая каждый столбец, отображает диапазон изменения выходного параметра (Δe) при вариации соответствующего входного параметра. Левый конец линии соответствует 5-му процентилю распределения Δe , а правый конец – 95-му. Точка на линии обозначает среднее значение Δe (составлено автором)

Для свинца (Pb) и мышьяка (As) значения на диаграмме свидетельствуют о положительной корреляции, т.е. их увеличение приводит к значительному изменению Δe , что подтверждает их высокую значимость в моделировании и обоснованность применения формул (1) и (2).

В отличие от свинца и мышьяка, параметр кадмия (Cd) показывает обратную корреляцию, т.е. его увеличение не приводит к ожидаемому положительному влиянию на Δe , а напротив, может снижать этот показатель. Это означает, что модель и уравнения, используемые для свинца и мышьяка, не применимы для кадмия, так как его влияние на нормированные изменения отличается.

Таким образом, метод МС позволяет учесть неопределенность в данных о содержании тяжелых металлов и ОВ и получить более реалистичную оценку риска экологического отказа. Проведенное тестирование формул (1) и (2) с данными о содержании вредных веществ в почве, экстраполированных на контекст строительства, выявило ряд вопросов и недостатков, ставящих под сомнение корректность и практическую применимость этих формул.

Абсолютные и относительные показатели измене-

ния непропорциональны друг другу: меньшим абсолютным изменениям могут соответствовать большие относительные изменения, а большим абсолютным изменениям – меньшие относительные. Формулы (1) и (2) используют абсолютное изменение концентрации (Δe_i) , что не учитывает масштаб начальных значений. Например, увеличение на 5 мг/кг будет иметь разное значение для района с фоновой концентрацией 10 мг/кг и для района с фоновой концентрацией 100 мг/кг. Поэтому их сравнение некорректно (другие авторы, напротив, полагают, что абсолютные изменения могут быть выражены в процентах и стать относительными величинами) [16].

Таким образом, подход с нормированными изменениями полезен для анализа постепенных и локальных изменений, но не до конца соответствует ситуации внезапных отказов. Внезапные отказы подразумевают резкие изменения, которые могут не всегда быть связаны с нормированными значениями или с постепенным превышением порогов. Например, в случае катастрофического события (авария на предприятии) изменение может произойти мгновенно и в значительном масштабе, что формулы (1) и (2) могут не отразить адекватно. В целом, к ним

следует обращаться для предварительной оценки экологического риска и в комплексе с другими методами анализа.

Модифицированные формулы для оценки экологического отказа в строительстве. Ниже представлены модифицированные формулы, учитывающие критические замечания и рекомендации по их исправлению.

1. Модифицированная формула для частичного отказа. Вместо формулы (1) предлагается следующая формула для оценки частичного экологического отказа:

$$\delta e_i \times w_i \leq e_{i \max}, \text{ если } e_i > e_{i \max}, \quad (3)$$

$$\delta e_i \times w_i \leq e_{i \min}, \text{ если } e_i < e_{i \min}, \quad (4)$$

где:

$\delta e_i = |Ae_i / e_i|$ – относительное изменение значения i -го параметра;

w_i – вес i -го параметра, отражающий его значимость для экосистемы;

$e_{i \max}$ – верхнее пороговое значение для i -го параметра;

$e_{i \min}$ – нижнее пороговое значение для i -го параметра;

2. Модифицированная формула для полного отказа. Формула (2) заменяется на следующую для оценки полного экологического отказа:

$$Ae = \sum (\delta e_i \times w_i) \leq Ae_{\text{крит}}. \quad (5)$$

где:

Ae – суммарное взвешенное изменение значений параметров экосистемы;

$Ae_{\text{крит}}$ – критическое значение суммарного взвешенного изменения, превышение которого указывает на полный отказ.

3. Определение Ae (общее изменение). Параметр Ae , используемый в расчете δe_i , может быть определен двумя способами:

– среднее изменение по экосистеме:

тогда $Ae = (\sum Ae_i) / N$, где $\sum Ae_i$ – сумма изменений концентрации во всех точках экосистемы, N – количество этих точек;

– изменение в контрольной точке:

тогда Ae рассчитывается для референтной точки с минимальным антропогенным воздействием. Использование контрольной точки с минимальным антропогенным воздействием позволяет оценить изменение параметров именно под влиянием строительства. Усреднение по всем точкам может «размыть» это влияние, особенно если на территории есть другие источники загрязнения.

4. Определение весов (w_i). Веса (w_i) определяются экспертным путем или на основе анализа экологической литературы [17, 18]. Они должны отражать относительную важность каждого параметра для функционирования экосистемы и возможные последствия его изменения. Вывод:

– предложенные модифицированные формулы являются более корректными и учитывают критические замечания, выявленные в ходе анализа исходных формул;

– для их практического применения необходимо

провести валидацию на реальных данных и определить конкретные значения порогов и весов для разных типов экосистем.

Чтобы продемонстрировать применение модифицированных формул, рассмотрим пример, в котором оценивается влияние строительства на концентрацию тяжелых металлов и ОБ в почве.

Пример решения с использованием модифицированных формул. Регулирование концентраций загрязнителей в почве и растительном субстрате сопряжено со значительными трудностями, в первую очередь, из-за сложности полного учета всех соответствующих экологических детерминант. Изменения исключительно агрохимических характеристик почвы, включая pH среды, содержание органического вещества, уровни насыщения основаниями и распределение частиц по размерам, могут значительно изменить концентрацию загрязнителей в несколько раз. Важно отметить, что нормирование содержания тяжелых металлов и ОБ в почвенных матрицах сопряжено с серьезными проблемами, связанными с неоднородностью исходных концентраций [19]. Существует много разных подходов к нормированию тяжелых металлов в почве [20, 21]. В большинстве случаев были предложены ПДК для тяжелых металлов, которые во много раз превышают установленные нормативные значения [22]. В данном анализе оцениваются относительные изменения концентраций загрязнителей, что позволяет учесть фоновое загрязнение и выявить наиболее значимые изменения, связанные со строительством.

Сценарий: Строительство жилого комплекса вблизи лесного массива.

1. Определение параметров и пороговых значений:

– e_i – концентрация свинца (Pb), кадмия (Cd) и мышьяка (As) в почве (мг/кг);

– E_j – суммарное воздействие Pb , Cd , As на экосистему (усл. ед);

– $e_{j \min}$ и $e_{j \max}$ заданы экспертным путем (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры и пороговые значения валидации

Параметр	Фоновое значение	$e_{i \min}$	$e_{i \max}$	$e_{j \min}$	$e_{j \max}$
Pb	20	15	40	10	50
Cd	0.5	0.4	1	5	25
As	10	8	20	10	50

2. Введение распределений для e_i :

– e_i (начальная) – логнормальное (медиана = фоновое значение, стандарт. отклонение = 10% от медианы).

– e_i (текущая) – треугольное (минимум = 80% от текущего значения, мода = текущее значение, максимум = 120% от текущего значения).

3. Текущие значения e_i (мг/кг):

– Pb – 35;

– Cd – 0,8;

– As – 18.

4. Веса (w_i):

- Pb – 0,5 (высокая токсичность, накопление в пищевой цепи);
- Cd – 0,7 (высокая токсичность, мобильность в почве);
- As – 0,3 (умеренная токсичность, канцероген).

5. Определение ΔE (общее изменение) (усл. ед). В данном примере будем использовать среднее изменение по экосистеме, предполагая, что замеры проведены в 5 точках (табл. 2).

Таблица 2 – Замеры концентраций загрязнителей

Точка	Pb (мг/кг)	Cd (мг/кг)	As (мг/кг)
1	35	0,8	18
2 контрольная	38	0,7	16
3	33	0,9	20
4	36	0,6	17
5	34	0,8	19

Модифицированная формула (5) уже учитывает веса параметров (w_i) для оценки суммарного воздействия. Поэтому нет необходимости усреднять изменения по всем точкам экосистемы, как это делается в первом способе. Рассчитаем Δe_i и ΔE (табл. 3).

Таблица 3 – Параметры и расчет ΔE (для контрольной точки – Точка 2)

Параметр	Фоновое значение	e_i (текущая)	Δe_i	$\delta e_i = \Delta e_i / e_i $	w_i	$\delta e_i * w_i$
Pb	20	38	18	0,474	0,5	0,237
Cd	0,5	0,7	0,2	0,286	0,7	0,2
As	10	16	6	0,375	0,3	0,113

6. Оценка частичного отказа по формуле $\delta e_i = |\Delta e_i / e_i|$:

– Pb : $\delta e_1 * w_1 = 0,237 < e_{i \max} = 40$. Частичный отказ не обнаружен.

– Cd : $\delta e_2 * w_2 = 0,2 < e_{i \max} = 1$. Частичный отказ не обнаружен.

– As : $\delta e_3 * w_3 = 0,113 < e_{i \max} = 20$. Частичный отказ не обнаружен.

7. Оценка полного отказа:

– $\Delta E = \sum (\delta e_j * w_j) = 0,237 + 0,2 + 0,113 = 0,550$.

Предположим, что $\Delta E_{\text{крит}} = 2,0$, тогда $\Delta E = 0,550 < \Delta E_{\text{крит}}$. Полный отказ не обнаружен. Видно, что:

– $\Delta E < e_{j \min}$ – суммарное взвешенное изменение значительно ниже нижнего порога для суммарного воздействия,

– $\Delta E < e_{j \max}$ – суммарное взвешенное изменение также значительно ниже верхнего порога.

8. Интерпретация результатов:

– Частичные отказы: По отдельным параметрам экологический отказ не обнаружен.

– Полный отказ: Суммарное взвешенное изменение значений параметров экосистемы не превышает критического значения, поэтому полный отказ также не обнаружен.

Таким образом, данный подход реализует логику модифицированной формулы (5) и позволяет корректно оценить суммарное взвешенное изменение

параметров экосистемы под влиянием строительства. Полученные в ходе моделирования значения Δe и δe_i следует сравнить с официальными ПДК и ОДК для загрязнителей, чтобы получить более точную оценку экологического риска.

Тем не менее важно, как указано в СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ», расширить набор параметров:

– включить не только тяжелые металлы и ОВ, но и другие факторы (физические воздействия, биологические факторы, социально-экономические аспекты);

– уточнить фоновые значения и их изменчивость (собрать дополнительную информацию о фоновых концентрациях загрязнителей и их естественной изменчивости в районе строительства);

– при расчете экологического риска и оценке значимости изменений параметров опираться на установленные нормативы и методики;

– учесть стадии проектирования и мониторинг (проводить моделирование на разных стадиях проектирования и включить в модель результаты экологического мониторинга).

Пример решения с использованием модифицированных формул, представленный выше, демонстрирует базовый подход к оценке экологического риска загрязнения почвы тяжелыми металлами и ОВ на примере строительства жилого комплекса.

Обсуждение. В данном разделе сравним результаты исследования с аналогичными работами, выполним их анализ и оценим место, которое результаты данного исследования занимают в общей структуре знаний.

Сравнение с предыдущими исследованиями. Наши результаты подтверждают эффективность применения метода МС для моделирования экологических рисков. В исследованиях, например, Hossaini и др. (2023) подчеркивается использование МС для управления экологическими рисками в контексте устойчивого строительства, где данный подход доказал свою способность учитывать неопределенности при моделировании вероятностных сценариев. Однако в данном исследовании, в отличие от предыдущих работ, введены модифицированные формулы, учитывающие весовые коэффициенты загрязнителей и относительные изменения концентраций, что позволяет учитывать специфику строительных проектов.

Сходства и различия с аналогичными исследованиями. Ранее в публикациях, таких как исследования Smirnova и др. (2022), МС применялся для оценки влияния различных источников загрязнения на окружающую среду. Основные результаты этих работ показали значимость анализа больших данных в экологическом контексте. Наше исследование расширяет эту концепцию, включая анализ не только тяжелых металлов, но и отравляющих веществ.

Оценка достоверности и обоснованность полученных результатов. Применение 10 000 симуляций и использование @Crystal Ball обеспечивает высокую степень надежности моделирования. Гистограммы, представленные в исследовании, показывают распределение значений с учетом неопределенности и демонстрируют адекватность модели для прогнозирования экологических рисков.

Обобщение и значение результатов. Полученные данные дают возможность оценить экологические риски с большей точностью, особенно на этапе строительства крупных объектов. Результаты подчеркивают необходимость учета пространственно-временных вариаций, что согласуется с выводами исследования Zhu и др. (2024) [23] о важности детализированных подходов для анализа загрязнителей.

Место в структуре известных знаний. Данное исследование заполняет существующий пробел в области применения МС для комплексного анализа загрязнителей почвы с учетом их варьированности данных. Это обеспечивает новый взгляд на управление экологической безопасностью в условиях строительных проектов. Авторы подчеркивают важность: (1) применения логнормальных распределений для описания фоновых концентраций загрязнителей; (2) внедрения трехточечных распределений (минимум, мода, максимум) для оценки текущих значений загрязнителей; (3) учет 95-го процентиля как верхней границы нормальных условий, что добавляет точности в анализ редких событий, связанных с экологическим риском. Скажем, в статье И.В. Белякова 50-й процентиль (P50) используется для оценки медианной ситуации, тогда как P90 помогает выявить наиболее неблагоприятные сценарии. Это важно для ранжирования рисков и сосредоточения усилий на наиболее критических. Введение процентилей позволяет детализировать анализ на уровне отдельных этапов проекта [4]. Такой подход дает возможность оценить риски с большей точностью, особенно на этапе строительства крупных объектов.

В нашей статье 95-й процентиль как индикатор отклонений позволяет более точно определить редкие, но значительные события. Беляков уделяет внимание финансовым превышениям, однако в экологии такие подходы критически важны для управления рисками катастроф. Средства для валидации и прогнозирования, представленные авторами, могут быть перенесены на оценку инфраструктурных проектов, чтобы учитывать влияние экологических рисков на стоимость и сроки строительства. С одной стороны, процентильный анализ помогает Белякову создавать сценарии управления: от оптимистичных (P10) до пессимистичных (P90), помогая принимать взвешенные решения в рамках ограниченного бюджета. С другой стороны, процентильный подход может быть дополнен инструментами машинного обучения и *Big Data* для лучшего прогнозирования [24]. Интеграция экологических данных в

финансовые модели, используя единый инструмент процентилей, позволяет комплексно оценивать последствия рисков. Кроме того, регрессионный анализ для построения модели зависимости вероятности превышения критического уровня загрязнения от различных факторов (объем строительных работ, тип используемых материалов, метеорологические условия и т.д.) в сочетании с процентильным подходом даст более точные прогнозы. Для моделирования различных сценариев развития проекта будут полезны построения «реестра рисков» и «матриц рисков» для систематизации информации о потенциальных рисках и их последствиях [12].

Выводы. Исследование показало, что разработка методики оценки экологического риска, связанного с изменением концентраций тяжелых металлов и других загрязняющих веществ в почве в условиях строительства, возможна с учетом неопределенности исходных данных посредством метода МС. Анализ традиционных формул оценки риска выявил их недостатки, включая отсутствие весовых коэффициентов и некорректный учет начальных значений, что привело к разработке модифицированных формул. Предложенные формулы, основанные на введении весовых коэффициентов и относительных изменений концентраций, обеспечивают повышение точности оценки экологического риска. Последующая валидация выполнена на основе большого объема экспериментальных данных, отражающих условия со значительным антропогенным воздействием на строительство.

Результаты, полученные с помощью программного софта, показали значительное улучшение точности оценки экологических рисков за счет применения модифицированных формул. Определение частичных отказов показало, что изменение параметров загрязнителей относительно пороговых значений связано с критическим ухудшением состояния окружающей среды. Полные отказы (значительные экологические ухудшения) были обусловлены превышением критических значений суммы изменений всех параметров.

Результаты применения методики показали достижение 95%-ной достоверности прогнозов экологического риска. Кроме того, торнадо-анализ выявил ключевые загрязнители, оказывающие наибольшее влияние на риск, что усиливает практическую ценность методики.

Таким образом, разработанная методика эффективно решает задачу оценки экологического риска в условиях неопределенности, предоставляя инструмент для более точного прогнозирования и управления рисками в строительных проектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пшеничкина В.А., Гриценко Б.С., Глухов А.В., Габова В.В., Дубовский М.Е. Оценка остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения с учетом коррозионного износа // Вестник МГСУ. 2023. – № 4 (18). – С. 533-544.

2. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения // Вестник МГСУ. 2023. – № 10 (18). – С. 1545-1555.
3. Яркова О.Н., Сидоренко Н.А. Моделирование сроков строительства дискретными цепями Маркова // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 2 (110). – С. 41.
4. Беляков И.В. О количественной оценке рисков инфраструктурных проектов с государственным участием // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2022. – № 4. – С. 30-60.
5. Nezhnikova E., Larionov A., Smirnova E. Ecological risk assessment to substantiate the efficiency of the economy and the organization of construction // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2021. Vol. 27 (8). – P. 2069-2079.
6. Smirnova E., Mamedov S., Shkarovskiy A. Improving the environmental safety risk assessment in construction using statistical analysis methods // Rocznik Ochrona Srodowiska. 2022. – Vol. 24. – P. 110-128.
7. Sadeghi N., Fayek A., Pedrycz W. Fuzzy Monte Carlo simulation and risk assessment in construction // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2010. Vol. 25 (4). VPP. 238-252.
8. Tysiak W., Sereseanu A. Project risk management using Monte Carlo simulation and Excel // Computing. 2010. Vol. 9 (4). – Pp. 362-367.
9. Mishra P., Tewari P., Mishra D.R., Dumka P. Integration based on Monte Carlo Simulation // International Journal of Mathematical Sciences and Computing. – 2023. – Vol. 9 (3). – Pp. 58-65.
10. Acebes F., González-Varona J. M., Lopez-Paredes A., Pajares J. Beyond probability-impact matrices in project risk management: A quantitative methodology for risk prioritisation // Humanities and Social Sciences Communications. 2024. – Vol. 11. – P. 670.
11. Brandimarte P. Handbook in Monte Carlo Simulation: Applications in Financial Engineering, Risk Management, and Economics, Hoboken, N.J.: Wiley, 2014. – 688 p.
12. Olaru M., Şandru M., Pirnea I.C. Monte Carlo method application for environmental risks impact assessment in investment project // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2014. – T. 109. – Pp. 940-943.
13. Морозова И.М. Радиологическая обстановка как одна из экологических проблем города Екатеринбурга // Научно-исследовательские публикации. – 2015. – № 2 (22). – С. 70-75.
14. Ларионов А.Н., Смирнова Е.Э. Метод оценки риска для организации экологической безопасности в сфере жилищного и промышленного строительства // Вестник МГСУ. – 2024. – № 11 (19). – С. 1797-1823.
15. US EPA. Use of Monte Carlo Simulation in Risk Assessments. URL: <https://www.epa.gov/risk/guiding-principles-monte-carlo-analysis> (дата доступа: 20.01.2025).
16. Гранатуров В.М. Экономический риск: сущность, методы измерения, пути снижения. 2-е изд. М.: Издательство «Дело и Сервис», 2002. – 160 с.
17. Markelj J., Kitek-Kuzman M., Grošelj P., Zbašnik-Senegačnik M. A Simplified method for evaluating building sustainability in the early design phase for architects // Sustainability. 2014. Vol. 6 (12). – P. 8775-8795.
18. Bragança L., Mateus R., Koukkari H. Building sustainability assessment // Sustainability. 2010. Vol. 2 (7). Pp. 2010-2023.
19. Экологические нормы и правила. ЭкоНП 17.03.01-001-2021 Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах и требования к их применению. Минск: Минприроды, 2021. – 34 с.
20. Васин Д.В. Современные подходы к нормированию содержания тяжелых металлов в почве // Архивариус. – 2021. – №3 (57). – С. 8-10.
21. Корчагина К.В., Смагин А.В., Решетина Т.В. Новый метод оценки степени загрязнения почв цинком и свинцом с учетом изменений их концентраций и плотности сложения по профилю почв // Вестник ОГУ. – 2013. – № 10 (159). – С. 264-267.
22. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Введ. 2006-01-19. М.: Госстандарт России, 2006. – 127 с.
23. Zhu G., Wen Y., Cao K., He S., Wang T. A review of common statistical methods for dealing with multiple pollutant mixtures and multiple exposures // Frontiers in Public Health. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1377685.
24. Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Азарова М.Д. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха // Вестник МГСУ. – 2024. – № 3 (19). – С. 456-468.

Статья поступила в редакцию 26.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 614.841.4

EDN: YEMBDW

ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ АВТОСТОЯНОК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

© Авторы, 2025

SPIN: 1940-8283

AuthorID: 1201536

ORCID: 0009-0009-2864-4901

МАЛЫШЕВА Екатерина Михайловна, аспирант*Уфимский университет науки и технологий**(450008, Россия, Уфа, улица К. Маркса, 12, e-mail: malysheva.em@ugatu.su)*

SPIN: 8260-0081

AuthorID: 623024

ORCID: 0000-0002-7642-4286

ResearcherID: G-1784-2013

ScopusID: 57194430277

НАСЫРОВА Элина Сагитовна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Безопасность производства и промышленная экология»

*Уфимский университет науки и технологий**(450008, Россия, Уфа, улица К. Маркса, 12, e-mail: elinasagitovna@yandex.ru)*

SPIN: 8653-2207

AuthorID: 1123386

ORCID: 0000-0001-5001-7773

ScopusID: 57192917040

БОЛЕГЕНОВА Салтанат Алихановна, доктор физико-математических наук, профессор,

заведующий кафедрой теплофизики и технической физики

*Казахский национальный университет имени аль-Фараби**(050040, Казахстан, Алматы, проспект аль-Фараби, 71, e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.edu.kz)*

Аннотация. Целью работы явилось рассмотрение существующих видов классификаций автостоянок с акцентом на пожарную безопасность. Анализ опубликованных работ по теме исследования показал, что существуют подземные и наземные автостоянки, которые подразделяются на многоуровневые/одноуровневые, открытые/закрытые и отопливаемые/неотопливаемые, при этом в нормативных документах отсутствует классификация автостоянок по площади. Путем применения метода построения классификационных шкал в работе предложена классификация автостоянок по площади. Согласно оптимальному значению числа интервалов группирования выборочных данных определено четыре класса автостоянок (очень малые, малые, средние и большие). Проанализирована динамика пожаров транспортных средств по годам и в зависимости от причин возникновения. Установлено, что существует три основные причины пожара, такие как нарушение правил устройства и эксплуатации транспортных средств, поджоги и неосторожное обращение с огнем. При этом данные по пожарам на автостоянках отсутствуют. Выявлена тенденция к снижению пожаров на транспортных средствах. Автостоянки являются элементом техносферы и для обеспечения их безопасности необходимо проектировать системы пожаротушения с учетом классификационного типа автостоянки.

Ключевые слова: транспорт, автостоянка, классификация, машино-место, наземная автостоянка, подземная автостоянка, признаки автостоянки, пожар, причины пожара, система пожаротушения.

ASSESSMENT OF FIRE HAZARD OF PARKING LOTS OF DIFFERENT TYPES

© The Author(s) 2025

MALYSHEVA Ekaterina Mikhailovna, phd student*Ufa University of Science and Technology**(450008, Russia, Ufa, Karl Marx st., 12, e-mails: malysheva.em@ugatu.su)***NASYROVA Elina Sagitovna**, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department "Production Safety and Industrial Ecology"

*Ufa University of Science and Technology**(450008, Russia, Ufa, Karl Marx st., 12, e-mails: elinasagitovna@yandex.ru)***BOLEGENOVA Saltanat Alikhanovna**, doctor of physical and mathematical sciences,

professor the head of the Department of Thermal Physics and Technical Physics

*Al-Farabi Kazakh National university**(050040, Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue st., 71, e-mails: Saltanat.Bolegenova@kaznu.edu.kz)*

Abstract. Objective is to review the existing types of parking lot classifications with a focus on fire safety. The analysis of published works on the research topic showed that there are underground and surface parking lots, which

are divided into multi-level/single-level, open/closed and heated/unheated, while there is no classification of parking lots by area in the normative documents. By applying the method of building classification scales, the paper proposes a classification of parking lots by area. Four classes of parking lots (very small, small, medium and large) are defined according to the optimal value of the number of intervals for grouping sample data. The dynamics of vehicle fires by years and depending on the causes of occurrence was analyzed. It is established that there are three main causes of fire, such as violation of the rules of device and operation of vehicles, arson and careless handling of fire. At the same time, there is no data on fires in parking lots. There is a tendency to decrease fires on vehicles. Parking lots are an element of the technosphere and to ensure their safety it is necessary to design fire extinguishing systems taking into account the classification type of the parking lot.

Keywords: transportation, parking lot, classification, parking space, surface parking lot, underground parking lot, signs of a parking lot, fire, causes of fire, fire suppression system.

Для цитирования: Малышева Е.М. Оценка пожарной опасности автостоянок различных типов / Е.М. Малышева, Э.С. Насырова, С.А. Болегенова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 157-164. – EDN: YEMBDW.

Введение. В настоящее время насчитывается около 1,5 млрд. транспортных средств в мире, в России более 45 млн. легковых автомобилей, что в свою очередь повышает спрос на автостоянки на придомовой территории. Сооружения для постоянного и временного хранения легковых автомобилей разнообразны. Согласно ГОСТ 33062–2014 автостоянка – это имущественный комплекс, обеспечивающий возможность отстоя и хранения транспортных средств, оборудованный площадкой для стоянки транспортных средств с парковочными местами. Парковка – это временное пребывание на стоянках автотранспортных средств, принадлежащих посетителям объектов различного функционального назначения (СТО НОСТРОЙ 2.23.134-2013). Помимо нормативной документации многие авторы изучают классификацию автостоянок [1, 2]. Достаточное внимание уделяется проблеме взрывопожарной опасности подземных автостоянок [3]. В связи с этим целью данной работы является рассмотрение существующих видов классификаций автостоянок с акцентом на пожарную безопасность.

Методология. Объектом исследования являются автостоянки. В работе применяется анализ нормативной и научной литературы.

Для классификации автостоянок по площади используется метод построения классификационных шкал, включающий построение эмпирической функции распределения. Оптимальные значения числа интервалов группирования в зависимости от типа распределения и объема выборочных данных указаны в таблице 1.

Унификатор формы эмпирической функции распределения (с):

$$c = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N} \sqrt{\frac{N-1}{\sum_{i=1}^N (z_i - \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{N})^2}}, \quad (1)$$

где Z – площадь i -й автостоянки;

N – объем выборки.

Эмпирическая функция распределения:

$$F = \frac{1}{N+1} \left(\frac{z-a}{b-a} + (x-1) \right), \quad (2)$$

где a – минимальная площадь автостоянки;

b – максимальная площадь автостоянки;

x – номер объекта в выборке.

Таблица 1 – Оптимальные значения числа интервалов группирования в зависимости от типа распределения и объема выборочных данных

N \ c	0,5	1,0	1,4	1,75	2,0	2,25	2,45	2,6	3,5
5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
25	3	3	3	3	3	3	3	3	3
40	4	4	4	4	4	4	4	4	4
55	4	4	4	4	4	5	5	5	5
70	4	4	4	4	5	5	6	6	6
85	5	5	5	5	6	6	7	7	7
100 и более	5	5	5	6	6	6	7	7	8

Результаты. В работе предпринята попытка классификации автостоянок по площади путем построения эмпирической функции [4]. Рассмотрен 51 объект с минимальной площадью 13,25 м² и максимальной 13250 м², т.е. с вместимостью от 1 до 1000 машино-мест. По рассчитанному значению идентификатора формы эмпирической функции распределения ($c=1,68$) и объему выборки

($N=51$) по таблице 1 определено число классов (n) группирования, равное 4.

Согласно полученным данным построена эмпирическая функция распределения автостоянок по площади (рис. 1).

В соответствии с полученными результатами составлена классификация автостоянок по площади (табл. 2).

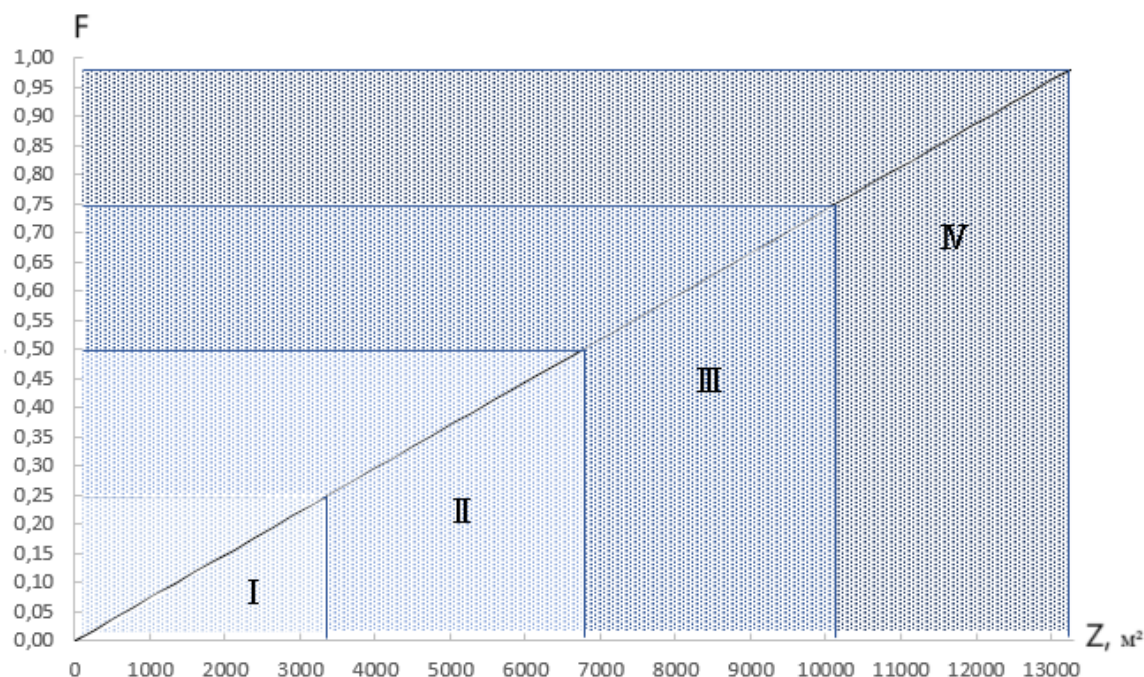


Рисунок 1 – Эмпирическая функция распределения автостоянок

Таблица 2 – Классы объектов по площади

Класс	Словесное описание	Площадь, м ²	Количество машино-мест, шт.
I	Очень малые (мини)	<3375	<249
II	Малые	3376-6744	250-519
III	Средние	6745-10135	520-759
IV	Большие	10136>	760>

В соответствии с полученными результатами от классификации автостоянок по площади, можно перейти к классификации по количеству, например, к очень малым автостоянкам относятся с количеством менее 250 машино-мест.

Обсуждение. В России стоянки автомобилей классифицируют с учетом их градостроительных, архитектурно-планировочных, конструктивных и функционально-технологических решений по СП 113.13330.2023 и выполняют:

- приобъектными и перехватывающими;
- размещаемыми ниже и (или) выше уровня земли; в подвальных или цокольных этажах, с использованием покрытия зданий; на этажерках, открытых площадках, на незастроенной территории под проездами;
- одноэтажными и многоэтажными; отдельно стоящими; пристроенными к зданиям другого назначения или встроенными в них;
- открытого или закрытого типа;
- отапливаемыми или неотапливаемыми;
- боксового или манежного типа, включающими многоярусную парковку автомобилей;
- модульными быстровозводимыми;
- включающими полуэтажи, пандусы, рампы, лифты для транспортирования автомобилей;

- механизированным, полумеханизированными;
- плавучими (дебаркадерными);
- обвалованными;

– имеющими в составе помещения для технического обслуживания автомобилей или без них.

Помимо классификаций, приведенных в нормативных документах, исследователи предлагают свою классификацию автостоянок. Например, Акимова А.Б. в своей работе автостоянки и гаражные помещения подразделяет на несколько типов в зависимости от рассматриваемого признака [1]:

- 1) характер ограждающих конструкций: открытые и закрытые;
- 2) расположение относительно поверхности земли: подземные и наземные;
- 3) устройство перемещения автомобилей между этажами: механизированные и автоматизированные;
- 4) внутренняя планировка хранения автомобилей: манежная и боксовая;
- 5) периодичность хранения автомобилей: временное, постоянное и сезонное.

Серебров Б.Ф. в своей работе приводит различные принципы классификаций автостоянок (табл. 3) [5].

Проведенный анализ классификаций автостоянок показывает, что отсутствует их единообразие.

Согласно приказу №П/0316 Федеральной службы

государственной регистрации, кадастра и картографии устанавливается минимально допустимый размер машино-места, который составляет 5,3х2,5м. В связи с этим, площадная характеристика автостоянок будет зависеть от количества автомобилей, которые в свою очередь регламентируются стандартными габаритами. Различают такие классы (типы) автомобилей: малые, средние, большие, микроавтобус, мототранспорт и средства индивидуальной мобильности. Класс автомобиля напрямую влияет на габариты парковочного места, что в свою очередь определяет архитектурно-планировочные решения автостоянки.

В соответствии с ГОСТ Р 52766–2007 стоянки автомобилей предусматриваются у пунктов питания, торговли, культурных, спортивных сооружений, административных зданий, источников питьевой воды и в других местах с систематическими остановками автомобилей, где вместимость площадок регламентируется согласно нормам. Например, у торговых центров площадью до 1000 м² предусматривается 2-4 машино-места на 100 м² торговой площади.

По данным справочника проектирования *Architects' Data* предложена классификация автостоянок

по площади: небольшие автостоянки, менее 100 м², средние – 100-1000 м², большие – более 1000 м² [6]. Подземными парковками могут называться автостоянки, которые располагаются ниже уровня земли более чем на 1,3 м.

Согласно Постановлению Акимата города Алматы (Республика Казахстан) от 28 февраля 2023 года № 1/126 «Об утверждении Правил определения категорий автостоянок (автопарковок, паркингов) в городе Алматы» существует 4 категории автостоянок:

- первая категория: служебные, штрафные автостоянки и парковки транспортных средств маломобильных групп населения и велотранспорта;
- вторая категория: автостоянки, расположенные в цокольных и подземных уровнях зданий, многоуровневые и автостоянки (площадочного типа), принадлежащие физическим и юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям;
- третья категория: надземные автостоянки открытого типа с постоянно закрепленными местами;
- четвертая категория: автостоянки, где в течение суток на одном месте паркуются несколько машин и используется суточный или часовой тариф.

Также согласно СП РК 3.03-105-2014 существует типология автостоянок, приведенная в таблице 4.

Таблица 3 – Классификационные признаки автостоянок

Классификационный признак	Тип автостоянки
Количество мест хранения	Малая, средняя, большой вместимости
Наличие средств технического обслуживания и ремонта	Комплексная, не комплексный гараж
Расположение к отметкам поверхности земли	Надземные, полуподземные, комбинированные
Этажность	Одноэтажный и многоэтажный гараж
Способ междуэтажного перемещения	Рамповая, механизированная, автоматизированные
Вид хранения	Постоянного и кратковременного хранения
Архитектурно-планировочное решение	Отдельно размещенная, встроенная, пристроенная
Способ хранения	Манежная, боксовая

Таблица 4 – Типология стоянок автомобилей по СП РК 3.03-105-2014

Плоскостные автостоянки	Организованные, наземные	Открытого хранения	
	Неорганизованные	Закрытого хранения (боксы, тенты)	
Здания, сооружения автостоянок	Отдельно стоящие	Надземные	
		Открытые	Закрытые
		Подземные	
		Модельные, быстровозводимые	
	Пристроенные	Обвалованные	
Парковочные устройства	Встроенные	Надземные	
		Открытые	Закрытые
	Надземная механизированная парковка	Надземные	
		Подземные	
		Отдельно стоящее мобильное многоярусное устройство загрузки автомобилей на платформы хранения	
		Пристроенные к зданиям автомобильные лифты	
Плавучая парковка на дебаркадере		Одноуровневая	
		Многоуровневая	

Данный документ рассматривает и комбинированные автостоянки открыто-закрытого типа, а также представляет классификацию по:

- длительности хранения (постоянное хранение, временное, сезонное);
- степени автоматизированности систем учета;

- условиям отапливаемости (отапливаемые или неотапливаемые автостоянки);
- организации перемещения автотранспортного средства – с участием или без участия водителя;
- организации хранения – манежные, боксовые, ячейковые, ярусные;

- высотности гаражей-стоянок – одноуровневые и многоуровневые;
- способу междуэтажного перемещения автомобилей – рамповые, полумеханические (рампы в сочетании с грузовым лифтом), механические – с грузовыми лифтами, автоматизированные;
- размещению в городской застройке – в зоне

объектов общегородского значения городской застройки (общественные, спортивные, культурные, торговые центры, вокзалы, аэропорты и др.), в коммунальных и других нежилых зонах, в жилой зоне.

Согласно проанализированным данным, в работе разработана классификация автостоянок, приведенная на рисунке 2.

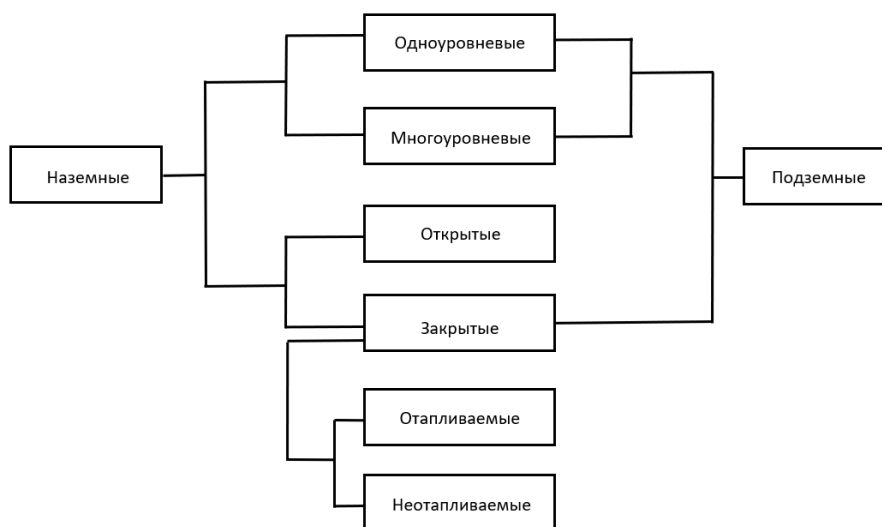


Рисунок 2 – Классификация автостоянок

Как видно из рисунка 2, в работе выделено два основных типа автостоянок: наземные и подземные.

Помимо архитектурно-планировочной классификации в научных работах рассматривается и классификация по пожарной опасности. Например, имеется категорирование помещений стоянок автомобилей и открытых стоянок по их взрывопожарным и пожарным опасностям [2]. Сделан вывод, что категорирование зависит от пожароопасных свойств топлива, в связи с чем предлагается включить в свод правил дополнительные критерии оценки пожарной опасности.

Танклевский Л.Т. и др. в своей работе анализируют тенденцию к возрастанию застройки новых автостоянок, в частности наземных закрытого типа и подземных [3]. Второй тенденцией в работе выделяют появление новых видов топлива, что приводит к проблеме взрывопожарной опасности и появлению вредных выбросов в атмосферу. В связи с этим в работе оценивают динамику опасных факторов пожара путем компьютерного моделирования. Выявлено, что подземные автостоянки при известных преимуществах обладают повышенной пожаровзрывоопасностью.

Другие авторы предлагают классификацию автостоянок по уровню обслуживания [7]. Согласно стандарту LoS необходимо разделять автостоянки на классы A, B, C, D в зависимости от формы использования, уровня восприятия пространства, комфорта передвижения и процесса парковки. Посредством данного разделения на начальном

этапе проектирования будут определяться основные планировочные решения автостоянки.

Поташев Д.А. изучает проблему взрывопожарной опасности многоуровневых подземных автостоянок. С помощью моделирования он показал, что параметры силовых и тепловых нагрузок при ударно-волновых процессах возгорания в замкнутых пространствах наносят наибольший ущерб конструктивным элементам сооружения. Им рассмотрено численное моделирование взрывов на подземных автостоянках [8].

Проведенный обзор классификаций автомобилей в работе Таранцева А.А. и др. показывает, что систематизация автомобилей зависит от таких характеристик как функциональное назначение, вид силовой установки и др. [9]. Исходя из этого анализа, сделан вывод, что по способам тушения пожаров автомобилей недостаточно литературных данных, что увеличивает риски распространения пожара на транспортных средствах. Авторы предложили разработать рекомендацию по тушению автомобилей, в связи с его отсутствием в нормативной базе.

Загитдинова Т.В. и Калошина С.В. рассматривают влияние различных факторов при выборе типа автостоянки, такие как градостроительные ситуации, прилегающие застройки, условия местности и рельефа, наличие рядом центров тяготения [10]. Также в их работе рассматриваются общие признаки, влияющие на классификацию автостоянок. Выявлено, что самыми распространёнными парковками являются открытые одноуровневые паркинги, но

наиболее безопасными и экологичными являются подземные автостоянки.

Изучением автостоянок занималась группа ученых во главе с Janak Parmar [11]. Данная статья представляет собой современный обзор моделей и исследований, посвященных парковочной системе. Подробно рассматриваются проблемы, связанные с выбором типа парковки. Рассмотрены различные характеристики парковок и их применение.

Как элемент техносферы, автомобильный транспорт и автостоянки независимо от их классификации должны быть безопасными. Однако, как показывают

данные Государственной противопожарной службы, пожары официально регистрируются на объектах транспортных средств, динамика распространения которых приведена на рисунке 3.

Как показывают данные рисунка 3, наблюдается тенденция к снижению пожаров на объектах «транспортные средства» [12].

Согласно проанализированным данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России на рисунке 4 приведено распределение пожаров транспортных средств в Российской Федерации по причинам их возникновения.

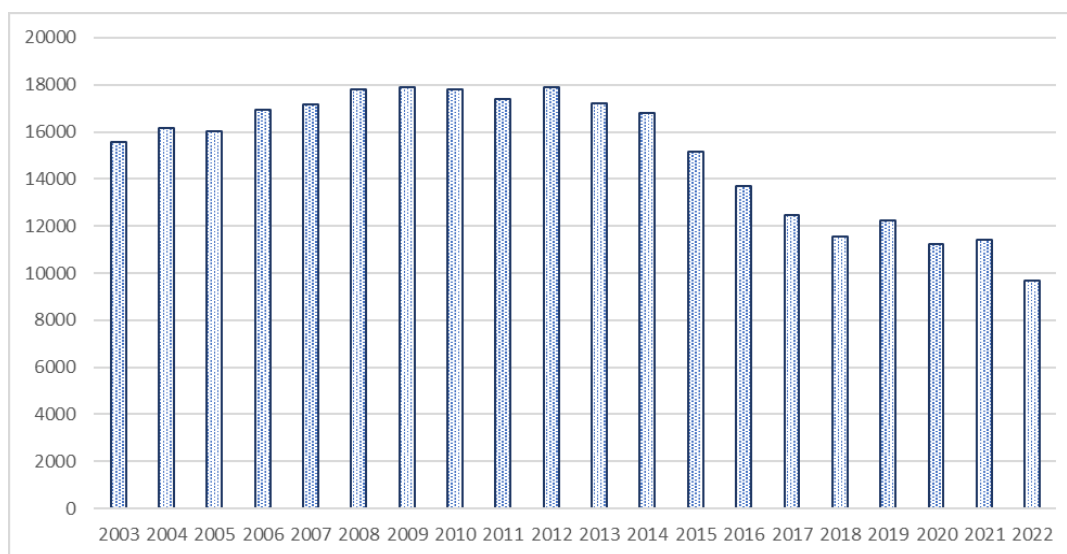


Рисунок 3 – Динамика пожаров на объекте «транспортные средства» за 2003-2022 гг.



Рисунок 4 – Распределение пожаров на транспортных средствах в Российской Федерации, произошедших в 2005-2022 гг., по причинам их возникновения

Как видно из рисунка 4, самой распространенной причиной возникновения пожаров является нарушение правил устройства и эксплуатации (ПУиЭ) транспортных средств, поджоги и неосторожное обращение огнем. В информационно-аналитическом сборнике МЧС России общая статистика пожаров

транспортных средствах по причинам их возникновения в 2023 году отсутствует, распределение показателей обстановки пожаров по различным причинам с данного года распределяется по субъектам Российской Федерации.

В связи с тем, что на автостоянках сосредоточено

большое количество автомобилей (горючая нагрузка), то возгорание одного из них может спровоцировать эскалацию, в результате которой огонь охватит все соседние объекты. Например, Xia Yan и др. описывают численное исследование теплового воздействия на стальные элементы каркаса при пожаре на открытой автостоянке [13].

Dan Burlacu и др. в своей работе представили оценку пожарного риска с помощью моделирования пожара в существующей подземной парковке [14]. Результат исследования представлен большим массивом данных, включающих время срабатывания спринклеров, максимальная температура, дымовой поток и общая динамика пожара. Dorota Brzezinska и др. показали, как особенности пожарной нагрузки разных автомобилей могут повлиять на применение систем пожарной безопасности на подземной автопарковке [15]. Группа ученых из Китая изучили распределение температуры в подземном вертикальном паркинге [16].

Результаты показали, что нагревательный эффект от пожара автомобиля на верхних этажах автостоянки больше, чем на противоположных боковых этажах.

Frank Markert and Luisa Giuliani смоделировали распространение пожара на автостоянке с участием автомобилей, работающих на обычном топливе и

водороде [17]. Полученные результаты помогают понять, как обеспечить достаточным уровнем безопасности конструкции, где находятся автомобили, работающие на водороде.

В своем исследовании Lazarenko O. и др. провели анализ в области пожарной опасности литий-ионных элементов питания, которые используются в аккумуляторных батареях электрокаров [18]. Peiyi Sun и др. рассмотрели пожары в аккумуляторных, гибридных и электрических автобусах, чтобы дать качественное представление о пожароопасности и рисках, связанных с аккумуляторными электро-мобильями [19]. Исследованием характеристик и процесса развития пожара литий-ионных аккумуляторов на параллельно припаркованных автомобилях занималась группа ученых Yan Cui и др. [20].

Для наглядности рассмотрим несколько примеров пожаров на автостоянке различных типов, которые приведены в таблице 5.

Приведенный анализ показывает, что основным типом автостоянок, который участвует в пожарах, являются автостоянки открытого типа. Основными причинами возникновения пожаров на автостоянках являются техногенные и человеческие факторы. На возникновение и развитие пожаров на этих территориях влияют различные проектировочные особенности.

Таблица 5 – Примеры пожаров на автостоянках

Дата	Место	Классификация	Причины	Последствия
14 сентября 2010 г.	г. Москва	Наземная открытого типа	Неосторожное обращение с огнем и поджог	Площадь пожара 150 м ² . Возгорание 12 автомобилей.
14 октября 2013 г.	г. Сидней, Австралия	Наземная открытого типа	Неосторожное обращение с огнем	Возгорание 80 автомобилей.
26 июня 2014 г.	г. Екатеринбург, улица Ушакова д.25	Наземная открытого типа	Короткое замыкание электропроводки в одном из автомобилей	Площадь пожара 370 м ² . Возгорание 12 автомобилей.
13 сентября 2014 г.	г. Волгоград, улица Шоссе Авиаторов	Наземная открытого типа	Перекачка нефтепродуктов	Возгорание 7 автомобилей.
15 июля 2018 г.	г. Шымкент, Казахстан	Наземная открытого типа	Неисправность электро-мобили	Площадь пожара 294 м ² . Возгорание 40 автомобилей.
7 апреля 2019 г.	г. Москва, Ленинградское шоссе, жилой дом №29	Подземная закрытого типа	Не установлены	Площадь пожара 500 м ² . Возгорание 7 автомобилей. Возгорание 8 гаражных боксов.
9 января 2020 г.	г. Ставангер, Норвегия	Подземная закрытого типа	Неисправность электро-мобили	Возгорание 300 автомобилей.
25 февраля 2020 г.	г. Челябинск	Подземная закрытого типа	Поджог	Возгорание 2 автомобилей.
14 апреля 2020 г.	г. Петропавловск, Казахстан	Наземные открытого типа	Неосторожное обращение с огнем (возгорание камыша)	Возгорание 6 автомобилей.
6 июня 2023 г.	г. Астана, Казахстан	Подземная закрытого типа	Неосторожное обращение с огнем	Возгорание 6 автомобилей. Пострадавшие 3 человека.
21 августа 2023 г.	г. Ацуги, Япония	Наземная многоуровневая открытого типа	Неисправность автомобиля	Возгорание более 100 автомобилей.
10 октября 2023 г.	г. Лондон	Наземная многоуровневая открытого типа	Неисправность дизельного автомобиля	Возгорание 1500 автомобилей. Пострадавшие 5 человек.
13 октября 2023 г.	Рязань, Куйбышевское шоссе	Наземная открытого типа	Не установлены	Площадь пожара 10 м ² . Возгорание 3 автомобилей.
28 августа 2024 г.	г. Норильск	Наземная закрытого типа	Короткое замыкание	Площадь пожара 40 м ² . Машины отсутствовали.
7 сентября 2024 г.	г. Москва, Одинцовский городской округ	Наземная многоуровневая типа	Неисправность автомобиля, возгорание газового баллона	Площадь пожара 713 м ² . Погибли 2 человека.

Выводы. В работе рассмотрено понятие «автостоянка» и типы классификаций данных объектов. Многообразие видов классификаций в той или иной степени усложняют точное понимание в принадлежности автостоянки к тому или иному классу, что приводит к затруднениям при оценке их безопасности. В работе предложена классификация автостоянок, учитывающая все рассмотренные виды. Выделено два основных типа автостоянок: наземные и подземные. Методом построения классификационных шкал в работе предложена классификация автостоянок по площади, включающая 4 класса автостоянок. Проанализировав динамику пожаров, выявлено, что пожары постоянны, при этом основными их причинами являются нарушение ПУиЭ транспортных средств, поджоги и неосторожное обращение с огнем. Поскольку автостоянки являются элементом техносферы, то для обеспечения их безопасности необходимо проектировать системы пожаротушения согласно СП 486.1311500.2020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Акимов А.Б. Классификация мест хранения автотранспорта с учетом пожарной безопасности // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: материалы всероссийской научно-практической конференции. Железногорск. 2019. – С. 297-302.
2. Попов В.И., Песикин А.Н., Пуганов М.В. Классификация автостоянок по пожарной опасности // Современные проблемы гражданской защиты. – 2021. – №1(38). – С. 75-79.
3. Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А., Поташев Д.А. Новый подход к автоматическому пожаротушению механизированных многоярусных автостоянок // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016: материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. – 2016. – Т. 1. – С. 270-273.
4. Леонтьева М.А., Храмова Л.А., Насырова Э.С., Аксенов С.Г. Классификация образовательных объектов по нарушениям противопожарных норм // Техносферная безопасность. – 2019. – № 1 (22). – С. 44-50.
5. Серебров Б.Ф. Многоэтажные гаражи и автостоянки: учебное пособие. Новосибирск. – 2005. – С. 18-21
6. Ernst Neufert, Peter Neufert. Architects' Data // John Wiley & Sons. – 2012. – P. 394.
7. Малышева Е.В. Классификация автостоянок по уровню обслуживания // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство: сборник статей 78-й всероссийской научно-технической конференции. Самара. 2021. – С. 550-555.
8. Поташев Д.А. Проблемы обеспечения пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: материалы Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. 2021. – С. 88-94.
9. Таранцев А.А., Сытдыков М.Р., Поташев Д.А. О пожароопасности некоторых типов автомобилей // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2021. – №1. – С. 1-8.
10. Загитдинова Т.В., Калошина С.В. Факторы, влияющие на выбор типа автостоянки // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2019. – Т. 2. – С. 141-144.
11. Janak Parmar, Pritikana Das, Sanjaykumar M. Dave. Study on demand and characteristics of parking system in urban areas: A review // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2020. – №7. – P.111-124.
12. Малышева Е.М., Гарданова Е.В. Анализ пожаров в городах по видам объектов // Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем (Техносферная безопасность-2024): материалы XXI Международной научно-практической конференции. Уфа. 2024. – С. 128-132.
13. Xia Yan, Marion Charlier, Thomas Gernay. Thermal response of steel framing members in open car park fires // Frontiers of Structural and Civil Engineering. – 2022. – P. 1071-1088.
14. Dan Burlacu, Ion Anghel, Constantin Popa, Ionuț Cășaru. Fire safety evaluation of an underground car park using numerical simulation // Mathematical Modelling in Civil Engineering. – 2018. – P. 1-12.
15. Dorota Brzezinska, Renata Ollesz, Paul Bryant. Design car fire size based on fire statistics and experimental data // Fire and Materials. 2020. Т.44. – Выпуск 8. – P. 1099-1107.
16. Junli Luo, Xin Zhang, Jiaming Zhao, Zhisheng Xu. Fire experiment on temperature distribution in an underground vertical car park // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. – W.15. – P.1-7.
17. Frank Marker, Luisa Giuliani. Hydrogen-fueled Car Fire Spread to Adjacent Vehicles in Car Parks. // International Conference on Hydrogen Safety. – 2019.
18. Lazarenko Oleksandr, Loik Vasyi, Shtain Bohdan. Research on the fire hazards of cells in electric car batteries // Safety & Fire Technology. – 2018. – P. 108-118.
19. Peiyi Sun, Roeland Bisschop, Huichang Niu, Xinyan Huang. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles // Fire Technology. – 2020. – P. 1361-1410.
20. Yan Cui, Jianghong Liu, Beihua Cong, Xin Han, Sumiao Yin. Characterization and assessment of fire evolution process of electric vehicles placed in parallel // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – P. 524-534.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 656.13:004.89

EDN: YECRPY

**РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ТРУДА
ВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

© 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
(РФ 443066 г. Самара, ул. Свобода, 2В, yulia_dementyeva@bk.ru)

SPIN: 5105-6241

AuthorID: 1025560

ORCID: 0000-0003-1092-3530

КОСЯКИН Виталий Сергеевич, кандидат технических наук,
начальник технического отдела Департамента экологии и техносферной безопасности
ОАО «РЖД»
(РФ 107217 г. Москва, ул. Садовая-Спасская, 21/1, KosyakinViS@center.rzd.ru)

SPIN: 9243-7382

AuthorID: 1143692

ORCID: 0000-0002-0185-5671

ТАТАРИНЦЕВ Святослав Дмитриевич, аспирант кафедры
«Безопасность жизнедеятельности и экология»
Приволжский государственный университет путей сообщения
(РФ 443066 г. Самара, ул. Свобода, sv2030@yandex.ru)

Аннотация. В настоящей статье изложено продолжение научной работы по повышению безопасности труда водителей АТС предприятий железнодорожного транспорта. В целях построения релевантной модели расчета рисков возникновения ДТП при осуществлении трудовой деятельности водителями АТС был расширен диапазон факторов, влияющих на безопасность дорожного движения. Таким образом приняты во внимание и учтены внешние факторы – безопасность маршрутов следования АТС и внутренние факторы – техническое состояние АТС. По результатам проведенного исследования была построена математическая модель расчета рисков возникновения ДТП и потенциального травмирования водителей АТС предприятий железнодорожного транспорта, которая учитывает в себе две дополнительные переменные: коэффициент технического состояния транспортного средства ($K_{\text{тех}}$) и коэффициент опасности дорожного движения ($K_{\text{одд}}$). На основе применения метода линейной регрессии был спрогнозирован тренд рисков дорожно-транспортных происшествий ($R_{\text{дтп}}$) на период 2024-2026 гг. Предложенная математическая модель позволяет определить потенциальные зоны риска возникновения ДТП, поэтому ее использование способствует обеспечению системного подхода в организации безопасных условий и охраны труда водителей АТС предприятий железнодорожного транспорта.

Ключевые слова. железнодорожная отрасль, риск ДТП, профессиональный риск травмирования, производственный дорожно-транспортный травматизм, математическое моделирование, эмпирическая формула, прогнозирование рисков ДТП.

**RISK ORIENTED FORECASTING IN ORGANIZING SAFE WORK FOR DRIVERS OF RAILWAY
TRANSPORT ENTERPRISES**

© The Author(s) 2025

DEMENTIEVA Yulia Vasilievna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Life Safety and Ecology
Volga State University of Railway Transport
(RF 443066 Samara, Svoboda st., 2B, yulia_dementyeva@bk.ru)

KOSYAKIN Vitaly Sergeevich, candidate of technical sciences,
head of the Technical Department of the Department of Ecology and Technosphere Safety
JSC «Russian Railways»
(RF 107217 Moscow, Sadovaya-Spasskaya St., 21/1, KosyakinViS@center.rzd.ru)

TATARINTSEV Svyatoslav Dmitrievich, graduate student of the Department of Life Safety and Ecology
Volga State University of Railway Transport
(RF 443066 Samara, Svoboda st., 2B, sv2030@yandex.ru)

Abstract. This article presents a continuation of scientific work on improving the labor safety of drivers of vehicles at railway enterprises. In order to build a relevant model for calculating the risks of road accidents during the work of ve-

hicle drivers, the range of factors affecting road safety was expanded. Thus, external factors - the safety of vehicle routes and internal factors - the technical condition of the vehicle - were taken into account. Based on the results of the study, a mathematical model was built for calculating the risks of road accidents and potential injuries to drivers of vehicles at railway enterprises, which takes into account two additional variables: the coefficient of the technical condition of the vehicle (K_{teh}) and the coefficient of road hazard (K_{odd}). Based on the application of the linear regression method, the trend in the risks of road accidents (R_{dip}) for the period 2024-2026 was predicted. The proposed mathematical model allows us to determine potential risk zones for road accidents, therefore its use helps to ensure a systematic approach to organizing safe conditions and labor protection for drivers of ATS at railway transport enterprises.

Keywords. railway industry, road accident risk, professional injury risk, industrial road traffic injuries, mathematical modeling, empirical formula, road accident risk forecasting.

Для цитирования: Дементьева Ю.В. Риск-ориентированное прогнозирование в организации безопасного труда водителей предприятий железнодорожного транспорта / Ю.В. Дементьева, В.С. Косякин, С.Д. Татаринцев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 165-169. – EDN: YECRPY.

Введение. В предыдущем научном исследовании, посредством использования составленной эмпирической формулы были рассчитаны коэффициенты безопасности дорожного движения K_{odd} , на основании которых определена тенденция снижения профессиональных рисков травмирования водителей автотранспортных средств (далее – АТС) в условиях возникновения дорожно-транспортных происшествий (далее – ДТП), тем самым доказана высокая эффективность применения бортовых систем мониторинга транспортных средств (далее – БСМТС), установленных в рамках эксперимента на автобусы марки Ford Transit, участвующих в обслуживании предприятий Куйбышевской железной дороги [1].

Деятельность предприятий железнодорожной отрасли, в связи со спецификой организации работ с высокой опасностью производственного процесса, ведущей к травмированию работников [2-4].

В соответствии с чем, основной задачей в части управления охраной труда, для ОАО «РЖД» является формирование проактивной системы управления рисками и создание условий труда, максимально комфортных и безопасных для сотрудников [5].

Исходя из результатов анализа травматизма на предприятиях железнодорожного транспорта было установлено, что наряду с общей положительной динамикой его снижения, ДТП является одним из наиболее часто повторяющихся видов происшествий, повлекших за собой несчастные случаи на производстве, в т.ч. со смертельным исходом [6-10].

В этой связи наличествует необходимость продолжения научных исследований причин дорожно-транспортного травматизма и разработки целенаправленных профилактических мероприятий по повышению безопасности труда водителей АТС.

В целях определения превентивных мероприятий, способных снизить риски возникновения ДТП и травмирования железнодорожников, в 2021 году был организован эксперимент по внедрению БСМТС, по итогам которого выведен коэффициент безопасности дорожного движения, с последующей оценкой релевантности организации монтажа данной системы.

Так как перед компанией ОАО «РЖД» как на

уровне государственного регулирования, так и внутреннего контроля специфика обеспечения охраны труда заключается в минимизации травмирования, исключения опасностей на всех рабочих местах [5].

В связи с доказанной эффективностью применения K_{odd} в формировании мероприятий по безопасности дорожного движения, а также не снижающегося количества ДТП считаем актуальным продолжение исследований по повышению безопасности труда водительского состава АТС предприятий железнодорожной отрасли.

Методология. Для реализации эксперимента были выбраны автобусы в количестве четырех единиц, участвующие в транспортном обслуживании предприятий, расположенных в границах территориальных управлений Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», с последующим монтажом на них систем БСМТС в 2021 году и по результатам анализа данных с которых был рассчитан коэффициент безопасности дорожного движения.

Для организации дальнейших исследований приведем значения динамики K_{odd} за период с 2019 по 2023 гг. (рис. 1).

На основании результатов проведенного эксперимента возникла гипотеза о зависимости рисков ДТП не только от нарушений водителями правил дорожного движения, но и от других факторов, таких как: техническое состояние АТС и трафик дорожного движения на выбранном водителем маршруте следования. В этой связи целесообразно создание инструмента расчета рисков ДТП с учетом данных показателей.

Целью проводимого исследования является создание математической модели, позволяющей прогнозировать риски возникновения ДТП, приводящие к травмированию работников предприятий железнодорожного транспорта, в т.ч. водителей и их пассажиров.

Технические характеристики активных систем безопасности автомобилей (тормозные колодки, автомобильные шины, ходовые огни и т.д.) снижаются по мере их эксплуатации, значит этот фактор будем учитывать, как коэффициент технического

состояния АТС ($K_{\text{тех}}$), являющийся отношением срока эксплуатации АТС (T_{ϕ}) к произведению общего количества рабочих дней за год (D_n) и среднесуточного пробега автомобилей в год ($L_{\text{общ}}$), и отобразим в формуле 1.

$$K_{\text{тех}} = \frac{T_{\phi}}{L_{\text{общ}} \times D_n} \times 1000 \quad (1)$$

где, T_{ϕ} – срок эксплуатации транспортного средства в годах;

$L_{\text{общ}}$ – среднесуточный пробег автомобилей в год;

D_n – общее количество рабочих дней за год.

В соответствии с требованиями нормативных документов ОАО «РЖД» среднесуточный пробег автомобилей составляет не более 120 км в один рабочий день вне зависимости от графика работы и режима рабочего времени водителей АТС. Куйбышевская

железная дорога – филиал ОАО «РЖД», в дополнении к установленным отраслевым требованиям определила, что дежурные автомобили участвуют в ежедневном круглосуточном транспортном обслуживании компании [11, 12].

Вводные данные для расчета коэффициента технического состояния АТС ($K_{\text{тех}}$) сведем в таблицу 1.

Срок эксплуатации АТС (T_{ϕ}) является единственным из всех изменяемым показателем, поэтому при проведении расчетов увеличим на 1 единицу, т.е. на каждый последующий год исследуемого периода. Рассчитаем T_{ϕ} , используя формулу 1, результаты сведем в таблицу 2.

Динамику изменения коэффициента технического состояния АТС ($K_{\text{тех}}$) исследуемого временного тренда отобразим на рисунке 2.

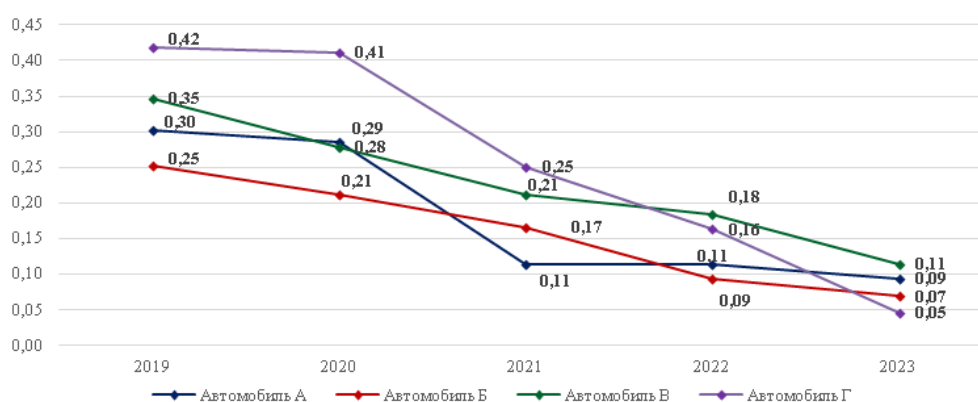


Рисунок 1 – Динамика коэффициента безопасности дорожного движения ($K_{\text{бод}}$) за период 2019-2023 гг.

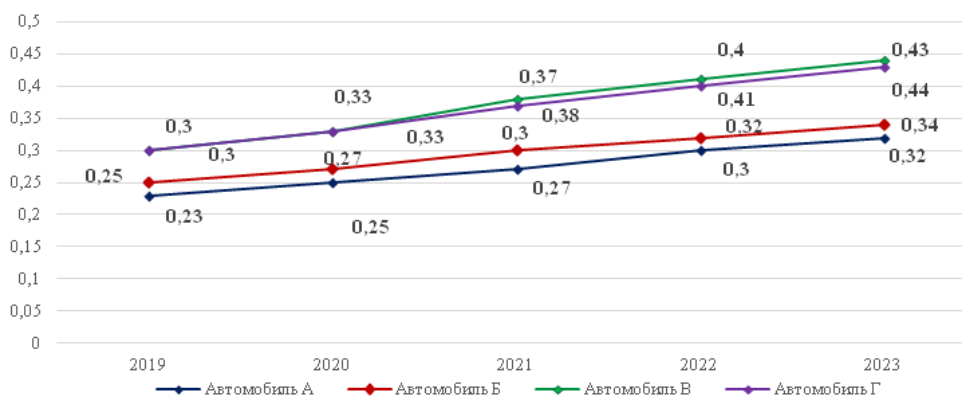


Рисунок 2 – Динамика коэффициента технического состояния АТС ($K_{\text{тех}}$) за период 2019-2023 гг.

Таблица 1 – Расчетные данные коэффициента технического состояния АТС ($K_{\text{тех}}$)

Показатели:	Автомобиль А	Автомобиль Б	Автомобиль В	Автомобиль Г
T_{ϕ} (лет)	10	11	11	10
$L_{\text{общ}}$ (км)	120	120	100	90
D_n (дней)	365	365	365	365

Таблица 2 – Коэффициент технического состояния АТС ($K_{\text{тех}}$) за период с 2019 по 2023 гг.

Год	Автомобиль А	Автомобиль Б	Автомобиль В	Автомобиль Г
2019	0,23	0,25	0,30	0,30
2020	0,25	0,27	0,33	0,33
2021	0,27	0,30	0,38	0,37
2022	0,30	0,32	0,38	0,40
2023	0,32	0,34	0,41	0,43

Водители АТС предприятий ОАО «РЖД», наряду с другими участниками дорожного движения, являются элементами весьма сложной многоуровневой системы «водитель – автомобиль – дорога – окружающая среда» (далее – ВАДС), что необходимо учитывать при построении безопасных маршрутов следования автомобилей.

Для оценки влияния дорожных условий на безопасность движения и определения адресных мероприятий по повышению безопасности движения на перегонах автомобильных дорог рассчитаем соответствующие коэффициенты опасности дорожного движения ($K_{одд}$), используя программу компьютерного моделирования движения автомобилей, разработанную ООО «ИНЭМДорТранс» и утвержденную отраслевым дорожным методическим

документом ОДМ 218.6.011-2013 [14].

Согласно утвержденным маршрутам следования экспериментальных автомобилей, расчетные показатели коэффициента опасности дорожного движения ($K_{одд}$) за период с 2019 по 2023 гг. представим в таблице 3.

На основании полученных данных составим математическую модель расчета рисков ДТП ($R_{дмп}$), которая представляет собой произведение коэффициента опасности дорожного движения ($K_{одд}$) с суммой коэффициента безопасности дорожного движения ($K_{бод}$) и коэффициента технического состояния транспортного средства ($K_{мс}$) (формула 2), результаты расчетов рисков ДТП ($R_{дмп}$) представлены в таблице 4.

$$R_{дмп} = K_{одд} \times (K_{бод} + K_{мс}) \quad (2)$$

Таблица 3 – Показатели маршрутов следования, коэффициент опасности дорожного движения ($K_{одд}$) за период с 2019 по 2023 гг.

Показатели:	Автомобиль А	Автомобиль Б	Автомобиль В	Автомобиль Г
Количество полос движения (шт)	2	2	4	6
Расстояние маршрута следования (км)	60	54	50	47
Коэффициент опасности дорожного движения ($K_{одд}$)	15	12	24,4	32

Таблица 4 – Расчетные показатели рисков ДТП ($R_{дмп}$) за период с 2019 по 2023 гг.

Год	Автомобиль А	Автомобиль Б	Автомобиль В	Автомобиль Г
2019	7,92	6,01	15,89	23,18
2020	8,12	5,81	14,85	23,84
2021	5,76	5,60	14,48	19,69
2022	6,10	4,92	14,42	17,78
2023	6,14	4,95	13,38	15,24

Результаты. Исходя из полученных расчетных показателей, в целях формирования прогноза рисков ДТП ($R_{дмп}$) на период с 2024 по 2026 гг., воспользуемся методом линейной регрессии, как одного из самых эффективных способов моделирования взаимосвязи между зависимыми переменными и независимым базисным периодом (формула 3) [14-20].

$$y = \bar{y} - \frac{\sum(x - \bar{x}) \times (\bar{y} - y)}{\sum(x - \bar{x})^2} \quad (3)$$

где, y – расчетный показатель рисков ДТП ($R_{дмп}$);

x – исследуемый период;

$\bar{y}$ – средний показатель рисков ДТП ($R_{дмп}$);

$\bar{x}$ – средний показатель исследуемого периода.

Используя формулу 3, произведем расчет прогноза рисков ДТП ($R_{дмп}$) на период 2024-2026 гг., полученные результаты отобразим в диаграмме на рисунке 3.

Обсуждение. Исходя из полученных результатов, была спрогнозирована тенденция снижения рисков возникновения ДТП ($R_{дмп}$) и потенциального травмирования водителей АТС Административно-хозяйственного центра – структурного подразделения Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» на период 2024-2026 гг.

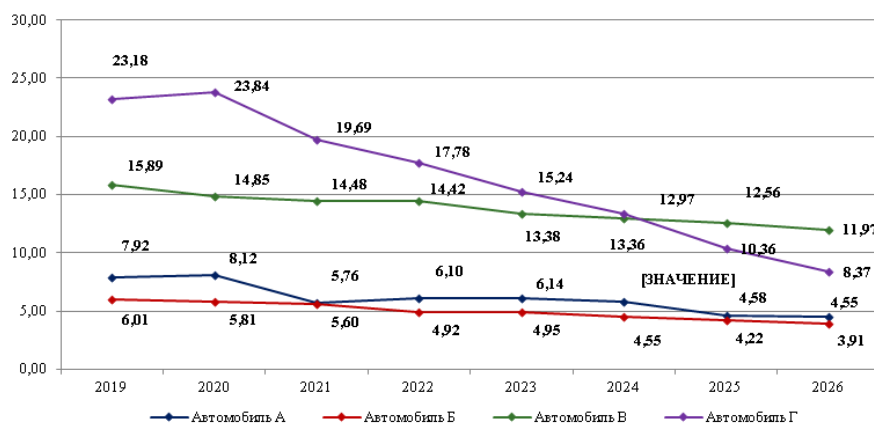


Рисунок 3 – Расчетные и прогнозные показатели рисков ДТП ($R_{дмп}$) на период 2019-2026 гг.

Исходя из вышеизложенного следует, что коэффициент опасности дорожного движения ($K_{\text{одд}}$) является неизменным на протяжении всего анализируемого периода, а коэффициент технического состояния ($K_{\text{тех}}$) возрастает по причине износа АТС. Наиболее значимое влияние на тенденцию динамики рисков возникновения ДТП и потенциального травмирования водителей АТС оказывает коэффициент безопасности дорожного движения ($K_{\text{бод}}$).

Выводы. Разработанная математическая модель является объективным способом расчета рисков ДТП ($R_{\text{дмп}}$), учитывающая в себе не только персональную ответственность водителей, но и техническое состояние АТС, а также воздействие внешних факторов в системе ВАДС.

Применение специалистами, ответственными за обеспечение безопасности дорожного движения на предприятиях железнодорожной отрасли, разработанной математической модели дает им возможность организовывать проактивные мероприятия, направленные на снижение рисков участия в ДТП ($R_{\text{дмп}}$) каждого отдельного АТС и повышение безопасности труда водителей этих АТС и их пассажиров.

Таким образом риск-ориентированное прогнозирование в организации безопасного труда водителей предприятий железнодорожного транспорта на основе предложенной математической модели является объективным способом разработки персонально направленных превентивных мероприятий, совершенствования существующей системы управления охраной труда в ОАО «РЖД» с учетом достигнутых результатов настоящих научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Деметьева Ю.В. Повышение безопасности труда водителей посредством внедрения бортовых систем мониторинга транспортных средств (на примере предприятий железнодорожной отрасли) / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики: Материалы IV Международной научно-методической конференции, Оренбург, 26-27 марта 2024 года. – Самара-Оренбург: Самарский государственный университет путей сообщения, 2024. – С. 313-316.
2. Деметьева, Ю.В. Оценка актуального состояния производственного травматизма на предприятиях железных дорог / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование транспорту» – Самара: СамГУПС, 2022. – С. 121-122.
3. Завьялов, А.М. Исследование причин несчастных случаев в хозяйстве пути на основе методов регрессионного анализа / А.М. Завьялов, Ю.В. Деметьева, Д.Л. Раенко // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – № 2. – С. 77-85. – EDN: OSXDWT.
4. Гаранин М.А., Завьялов А.М., Деметьева Ю.В. Корреляционное исследование влияния причин несчастных случаев на статистические показатели производственного травматизма // Известия ПГУПС. – 2017. – № 3. – С. 501-512.
5. СТО РЖД 15.001-2023 «Система управления охраной труда в ОАО «РЖД». Общие положения», утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 09.03.2023 № 515р. – М.: ОАО «РЖД», 2023. – 52 с.
6. Деметьева, Ю.В. Стохастический факторный анализ производственного травматизма на предприятиях железнодорожного транспорта / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 4. – С. 6-11.
7. Деметьева, Ю.В. Исследование причин дорожно-транспортного травматизма на предприятиях железных дорог / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Наука и техника транспорта № 2, 2023; научно-технический журнал-М.: Изд-во РОАТ РУТ. – 2023. – С. 106-109.
8. Деметьева, Ю.В. Анализ дорожно-транспортного травматизма на предприятиях железных дорог / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Сб. материалов II Междунар. школы – конференции «Техносферная безопасность городских агломераций». – Москва: РУТ (МИИТ), 2022. – С. 152-154.
9. Деметьева, Ю.В. Проблема автотранспортного травматизма на предприятиях железных дорог / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Сб. материалов XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорусской ж.д. «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель: БелГУТ, 2022. – С. 16-18.
10. Деметьева, Ю.В. Цифровизация управления охраной труда при эксплуатации автомобилей на предприятиях железных дорог / Ю.В. Деметьева, С.Д. Татаринцев // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 2. – С. 108-109.
11. Распоряжение ОАО «РЖД» от 14 февраля 2024 г. № 431/р «Об утверждении порядка использования служебных легковых автомобилей и микроавтобусов филиалами, структурными подразделениями ОАО «РЖД».
12. Приказ начальника Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» от 20 марта 2024 г. № КБШ Н-245/п «Об утверждении порядка использования служебных легковых автомобилей и микроавтобусов на полигоне Куйбышевской железной дороги».
13. ОДМ 218.6.011-2013 «Методика оценки влияния дорожных условий на аварийность на автомобильных дорогах Федерального значения для планирования мероприятий по повышению безопасности дорожного движения» разработанный ООО «ИНЭМДорТранс», изданным на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 25 февраля 2013 г. №226-р.
14. Ротова О.М. Основные принципы метода линейной регрессии / Ротова О.М. // "Теория и практика современной науки" №1(55) 2020.
15. Westfall P.H. Understanding regression analysis: a conditional distribution approach / P.H. Westfall, A.L. Arias. – Chapman and Hall/CRC, 2020. – 514 p. <https://doi.org/10.1201/9781003025764>.
16. Коротеев М.В. Обзор некоторых современных тенденций в технологии машинного обучения / М.В. Коротеев // E-Management. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 26-35.
17. Tamura R. Mixed integer quadratic optimization formulations for eliminating multi-collinearity based on variance inflation factor / R. Tamura, K. Kobayashi, Y. Takano, R. Miyashiro, K. Nakata, T. Matsui // Journal of Global Optimization. – 2019. – Vol. 73, No. 2. – P. 431-446. <https://doi.org/10.1007/s10898-018-0713-3>.
18. Sato T., Takano Y., Miyashiro R., and Yoshise A. (2016). Feature subset selection for logistic regression via mixed integer optimization. Computational Optimization and Applications, 64 (3). – С. 865-880.
19. Pillay A., Prabhakar Karthikeyan S., Kothari D.P. Congestion management in power systems – a review // Int. J. Electr. Power Energy Syst. – 2015. – V. 70. – P. 83-90.
20. Негодин В.А. Машинное обучение в языке программирования Python. Форум молодых ученых. 2019; 8(36): 201-203.

Статья поступила в редакцию 06.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 331.451

EDN: VQXMDF

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ЗАПЫЛЕННОСТЬ ВОЗДУХА НА РАБОЧИХ МЕСТАХ
ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 7885-0278

AuthorID: 1076522

ORCID: 0000-0003-3273-8301

ResearcherID: AFM-8358-2022

ScopusID: 57207040142

ИЛЪЯШЕНКО Игорь Сергеевич, аспирант

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: igor.ilyashen@ya.ru)

SPIN: 5251-6351

AuthorID: 352624

ORCID: 0000-0003-2074-9695

ResearcherID: AAI-1662-2019

ScopusID: 6603960148

КОРШУНОВ Геннадий Иванович, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры безопасности производств

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

SPIN: 6083-8918

AuthorID: 609618

ORCID: 0000-0003-4882-4714

ResearcherID: AAA-2649-2019

ScopusID: 55639182000

КОВШОВ Станислав Вячеславович, кандидат технических наук, доцент,
заместитель проректора по специальным программам

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

(199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, e-mail: Kovshov_SV@pers.spmi.ru)

Аннотация. Исследование посвящено установлению и оценке статистической связи между концентрацией пыли в воздухе рабочих зон предприятий минерально-сырьевого комплекса и микроклиматическими параметрами воздуха на основе фактических данных о состоянии воздуха в условиях карьера по добыче полиметаллических руд. Измерение параметров воздуха проводилось с применением счетчика пылевых частиц СЕМ DT-9880, пылемера ПКА-01, термогигрометра Testo 625. Для оценки статистической связи использовались методы определения характера распределения выборочной совокупности, параметрический метод оценки коэффициента корреляции Пирсона, метод множественной регрессии для построения математической модели. В результате исследования было установлено, что наиболее значимым фактором в формировании пылевой нагрузки является скорость движения воздуха (коэффициент корреляции $r = 0,71$), менее значимы – атмосферное давление ($r = 0,54$) и относительная влажность воздуха ($r = -0,52$). Температура воздуха оказывает наименьшее влияние на запыленность воздуха ($r = 0,30$), в связи с чем фактор температуры не был включен в регрессионную модель. По методу множественной регрессии была предложена математическая модель для прогнозирования запыленности воздуха с учетом заданных микроклиматических показателей, отражающая характер связи между параметрами и вклад каждого из влияющих на отклик факторов.

Ключевые слова: охрана труда; аэрозоли преимущественно фиброгенного действия; производственная пыль; микроклимат; корреляция; коэффициент Пирсона; множественная регрессия.

**STATISTICAL CORRELATION METHODS FOR ASSESSING THE IMPACT OF CLIMATIC
VARIABLES ON AIR DUSTINESS IN OPEN-PIT MINES**

© The Author(s) 2025

ILIASHENKO Igor Sergeevich, post-graduate student

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St.Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: igor.ilyashen@ya.ru)

KORSHUNOV Gennadiy Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of Industrial Safety Department

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

(199106, Russia, St.Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: korshunov_gi@pers.spmi.ru)

KOVSHOV Stanislav Vyacheslavovich, candidate of technical sciences, associate professor

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(199106, Russia, St.Petersburg, 21st Line, 2, e-mail: Kovshov_SV@pers.spmi.ru.ru)

Abstract. The study is dedicated to the investigation and analysis of the statistical correlation between dust concentration in the working areas of mineral resource industry enterprises and microclimatic air parameters, based on real data on air conditions in a polymetallic ore open-pit mine. Air parameters were measured using a CEM DT-9880 dust counter, a PKA-01 dust meter, and a Testo 625 thermohygrometer. To assess the statistical correlation, methods were used to determine the distribution of the statistical sample, the parametric approach for estimating the Pearson correlation coefficient, and the multiple regression technique for developing a mathematical model. As a result of this study, it has been found that the main factor influencing dust load is air velocity (Pearson coefficient $r = 0.71$). Less significant factors include atmospheric pressure ($r = 0.54$) and relative humidity ($r = -0.52$). The air temperature had a minor impact ($r = 0.3$) and was excluded from the regression model. A mathematical model was developed using the multiple regression technique to predict air dust levels, taking into account specified microclimatic factors. This model reflects the nature of the relationship between these parameters and the contributions of each factor influencing the response.

Keywords: occupational safety; aerosols of predominantly fibrogenic action; industrial dust; microclimate; correlation; Pearson coefficient; multiple regression.

Для цитирования: Ильяшенко И.С. Методы оценки статистических связей для определения влияния климатических параметров на запыленность воздуха на рабочих местах открытых горных работ / И.С. Ильяшенко, Г.И. Кориунов, С.В. Ковшов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 170-179. – EDN: VQXMDf.

Введение. Современные технологические процессы на предприятиях минерально-сырьевого комплекса характеризуются значительным вредным и опасным воздействием производственной среды на работников. Работа в условиях влияния производственных факторов среды и трудового процесса приводит к ухудшению общего функционального состояния персонала, снижению работоспособности и внимания, развитию профессиональных патологий, что в совокупности приводит не только к снижению производительности и прямым экономическим потерям, но и к развитию травмоопасных ситуаций [1, 2]. Реализация неблагоприятных событий в виде профессиональных заболеваний работников и их травмирования вследствие воздействия перечисленных факторов становится причиной частичной (временной) или полной утраты трудоспособности, что идет вразрез с национальной политикой Российской Федерации [3, 4]. Кроме того, снижение трудового и кадрового потенциала приводит к социальным и экономическим потерям, к невозможности полноценной реализации всех ресурсов страны [5]. Обеспечение достойных и безопасных условий труда нормативно закреплено в ст.37 Конституции РФ и Трудовом Кодексе РФ (ст. 209.1). Соблюдение предъявляемых требований способствует достижению установленных социальных и экономических целей устойчивого развития за счет сохранения человеческого капитала, роста уровня жизни и ее продолжительности [6]. Поэтому решение проблем, связанных с обеспечением безопасных условий труда на производстве, становится одной из наиболее приоритетных современных задач общества.

Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия (АПФД) остаются одним из наиболее значимых факторов производственной среды по вкладу в формирование профессиональных рисков развития патологий у работников. На текущий момент пылевой фактор занимает третье место среди прочих вредных

факторов по количеству выявленных профессиональных заболеваний среди работников [7]. Работа в условиях повышенной запыленности воздуха рабочей зоны приводит к развитию широкого перечня серьезных патологий. Прежде всего, вдыхание респираторной фракции пыли становится причиной развития пылевых бронхитов и пневмокониозов [8]. Более того, воздействие промышленных аэрозолей вызывает раздражение слизистых оболочек дыхательных путей, глаз, приводит к раздражению кожи, а также способствует развитию сердечно-сосудистых заболеваний [9, 10]. Повышенная запыленность воздуха рабочей зоны также ухудшает видимость и затрудняет различение элементов, ведет к перенапряжению зрительного аппарата и центральной нервной системы, приводит к повышенной утомляемости и, как следствие, к росту риска травмирования [11, 12].

На сегодняшний день проблемой повышенной запыленности воздуха рабочих зон на предприятиях минерально-сырьевого комплекса обеспокоены многие ученые и специалисты охраны труда и промышленной безопасности. Ряд экспертов посвящают свои труды разработке и поиску технических и технологических решений для снижения запыленности воздуха путем пылеулавливания, пылеосаждения и пылеподавления.

Так, например, в исследовании Строковой В.В. и соавторов рассматривались различные водные эмульсионные составы в качестве пылеподавателей, а также оценивалась их эффективность [13]. Авторы предлагают к применению склеивающие и пленкообразующие составы-пылеподаватели, способствующие агломерации (склеиванию) пылевых частиц и повышению качества пылеподавления. При этом эффективность предлагаемых средств авторы оценивают по изменению краевого угла смачивания на поверхности консолидированной пылевой массы, что отражает способность образованного материала

к отталкиванию воды – гидрофобности. Однако в исследовании не рассматривается вопрос дисперсности использованного материала: от размеров пылевых частиц зависит количество воздуха в консолидированной массе. Образованные полости потенциально могут быть заполнены пылеподавателем и повлиять на эффективность прессования, а также способны повлиять на распределение сил и напряжений внутри образца при испытаниях на прочность. Более того, химический состав пылевого материала также оказывает влияние на эффективность работы пылеподавляющего средства за счет разной способности к сорбции газов и жидкостей, за счет разной формы частиц, их пористости.

При этом эффект от внедрения мероприятий по снижению интенсивности пылеобразования может зависеть не только от физико-химических характеристик применяемых материалов, но и от параметров среды, в которой применяются средства пылеподавления. Такое влияние может быть значительным ввиду большого количества факторов: климат и микроклимат, генезис и химический состав пылящего материала, способ (причина) его образования, широкий перечень условий местности, в которой расположено месторождение полезного ископаемого и иное.

В Китае в связи с высокой интенсивностью производства уже продолжительное время ведется интенсивная работа по разработке мероприятий, направленных на улучшение условий труда работников по пылевому фактору. Так, например, в научной работе Gang Li и других [14] представлен обзор средств по снижению запыленности воздуха на подземных рудниках Китая, в том числе приведен анализ систем орошения, пылеподавателей, изолирующих перегородок и завес, параметров вентиляции. Авторы подчеркивают, что современные решения могут быть высокотехнологичными, но теряют в эффективности вследствие малого внимания к внешним факторам. В исследовании указывается, что механизм образования пыли на разных технологических операциях разный, что приводит к различиям в физических и химических свойствах пылевых частиц. Указанные характеристики могут отражаться, например, в высокой гидрофобности пылящего материала и низкой эффективности гидрооросительных установок или отдельных поверхностно-активных веществ (ПАВ). Однако авторами не затрагивается вопрос влияния микроклиматических параметров на эффективность средств пылевого контроля, например, относительной влажности воздуха.

В исследовании команды польских ученых [15] изучалось влияние температуры и относительной влажности воздуха на концентрацию пылевых частиц респираторной фракции (до 2,5 мкм и до 10 мкм – PM_{2,5} и PM₁₀) с учетом индекса качества воздуха AQI (*air quality index*) в исследуемых зонах. Авторами указывается, что в загрязненных зонах со средним и высоким индексом качества воздуха ими была зарегистрирована отрицательная корреляция между температурой и концентрацией пыли в воздухе (то есть,

чем меньше температура, тем выше запыленность воздуха) и положительная корреляция между относительной влажностью воздуха и концентрацией аэрозоля (то есть чем выше влажность, тем больше значение концентрации пыли). Однако в зонах с относительно чистым воздухом и малым индексом качества воздуха корреляцию между параметрами ученые не обнаружили. Кроме того, исследователи отмечают, что изменение относительной влажности воздуха в большей степени влияет на концентрацию пыли респираторной фракции, чем изменение температуры воздуха.

Похожее исследование польских ученых A. Ziernicka-Wojtaszek и других [16] было посвящено изучению воздействия климатических параметров на концентрацию аэрозолей PM_{2.5} в воздухе в пределах населенного пункта. Авторами был исследован большой массив метеорологических данных за 10-летний период в весенний, летний, осенний и зимний периоды. В качестве вводных данных использовались: температура воздуха, скорость движения воздуха (ветра), относительная влажность воздуха, атмосферное давление и количество осадков. Для установления связи фактор-отклик ученые использовали метод главных компонент (*principal component analysis – PCA*): таким образом авторы сокращают объем анализируемых материалов и выделяют факторы, в значительной степени влияющие на концентрацию пыли в воздухе. В результате авторами было установлено, что концентрация пыли в воздухе во многом определялась его температурой. Остальные факторы оказывали разное влияние в зависимости от периода: в весенний период также имели влияние скорость воздуха и осадки, в меньшей степени – относительная влажность; в летний период авторы выделяют влияние атмосферного давления и относительной влажности воздуха. Авторы строят корреляционные матрицы, выделяют по 3 главных фактора на каждый период и оценивают их значимость по собственному числу (*eigenvalue*).

Работа турецких ученых [17] также приводит оценку статистической связи метеорологических параметров с концентрацией аэрозоля PM₁₀ в городских и сельских условиях. В качестве факторов ученые исследовали температуру, относительную влажность воздуха, скорость и направление ветра. Авторы применяют ряд статистических методов для оценки распределения выборки, оценивают корреляционную и регрессионную зависимости между изучаемыми параметрами. Согласно полученным результатам, относительная влажность воздуха в наибольшей степени оказывает влияние на концентрацию PM₁₀, а температура воздуха – наименее значимый фактор из исследованных. Исследование российских ученых [18] также показывает, что увеличение относительной влажности воздуха ведет к снижению концентрации пыли, особенно – грубодисперсной.

В работе китайского ученого Yaping Shao [19] предлагается модель оценки влияния относительной влажности воздуха на вынос пыли с поверхностей.

Ученый в своей работе показывает, что существует прямая корреляция между концентрацией пыли в воздухе и относительной влажностью воздуха, но связь устанавливается с задержкой в несколько часов. В связи с этим автор делает вывод о косвенном влиянии влажности воздуха на адгезию – сложное и до конца не изученное свойство материалов, которое может отражать интенсивность пылевыноса с поверхности за счет эрозии.

Обзор научных трудов подтверждает, что вопрос идентификации факторов, влияющих на интенсивность образования пыли или осаждение взвешенного аэрозоля, актуален и интересует множество ученых мира. Интерес к данной проблеме связан с поиском возможности прогнозирования запыленности воздуха, что в свою очередь может позволить значительно эффективнее управлять процессами образования пыли и ее подавления в рабочих зонах и населенных пунктах, эффективнее внедрять и применять мероприятия по охране труда и защите окружающей среды [20, 21].

Снижение запыленности воздуха рабочих зон способствует оздоровлению рабочих мест, снижению рисков развития профессиональных патологий пылевой этиологии, падению уровня травматизма на рабочих местах за счет улучшения условий труда, а также снижения нагрузки производственной среды на функциональный аппарат работника. Кроме того, внедрение мероприятий по борьбе с пылеобразованием имеет косвенный положительный эффект, поскольку снижается нагрузка на экосистемы в зоне влияния предприятия, снижается интенсивность износа работающего оборудования, особенно вращающихся и трущихся деталей, что лишь подчеркивает значимость проблемы повышенной запыленности и интенсивного пылеобразования.

Методология. Целью исследования является установление связи между концентрацией пыли в воздухе рабочих зон и микроклиматическими параметрами воздуха в данной зоне. Для достижения цели исследования необходимо выполнить ряд задач, а именно: осуществить подбор методов для установления наличия связи и ее оценки на основании обзора научных работ; получить фактические данные о уровне запыленности и микроклимате в производственных условиях; установить наличие статистической связи выбранным методом; разработать математическую модель прогнозирования зависимой величины.

Для получения фактических данных о запыленности воздуха на рабочих местах открытых горных работ, а также о микроклиматических параметрах и их влиянии на концентрацию пыли в воздухе, был осуществлен выезд на предприятие по добыче полиметаллических руд в Забайкальском крае. Эксперимент проводился на территории горнорудного карьера.

Оценка корреляционной связи между исследуемыми параметрами, а именно концентрацией пыли в воздухе и микроклиматическими показателями, проводилась по результатам ряда измерений. Расширен-

ный список измеряемых параметров включает:

- концентрацию пыли в воздухе рабочей зоны, мг/м³;
- температуру воздуха, С;
- относительную влажность воздуха, %;
- скорость движения воздуха, м/с;
- атмосферное давление, Па.

Сбор необходимых данных для дальнейшей обработки осуществлялся с применением прибора контроля запыленности воздуха ПКА-01, счетчика пылевых частиц *CEM DT-9880*, термогигрометра *Testo 625*.

Полученные данные сводятся в таблицу и представляют собой значительный массив данных с соответствующими значениями параметров: одному значению концентрации пыли соответствуют конкретные измеренные значения микроклиматических показателей.

Для установления наличия и вида связи между исследуемыми количественными параметрами были использованы методы статистического анализа, а именно:

- методы определения вида распределения эмпирических данных (графический и аналитический);
- методы нормализации распределенного множества данных;
- метод установления корреляционной связи с помощью расчета коэффициента Пирсона;
- метод множественной регрессии.

Определение вида распределения эмпирических данных не только дает представление о том, какие факторы и каким образом оказали воздействие на итоговые результаты измерений, но и позволяет выбрать подходящие критерии оценки вида и силы связи между множествами изучаемых параметров [22].

Нормализация данных, или приведение к нормальному распределению, необходимо для обеспечения возможности применения параметрических методов оценки корреляции, предъявляющих куда более высокие требования к выборке данных, но имеющих большую степень точности и достоверности итоговых значений.

Определение наличия, вида и силы корреляционной связи дает представление о том, меняются ли те или иные параметры (в данном случае – количественные) совместно, то есть потенциально оказывают ли влияние друг на друга или нет [23]. Множественная регрессия дает возможность разработать математическую модель для отражения характера зависимости между параметрами и прогнозирования зависимой величины по измеренным данным независимых величин – влияющих факторов [24].

Результаты. В результате проведенных измерений и опытов был получен значительный массив данных, в том числе результаты измерения запыленности воздуха в рабочих зонах (РЗ) на территории горнорудного карьера, результаты определения микроклиматических параметров воздуха в местах измерения (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха, атмосферное давление).

Фрагмент полученного массива данных представлен в таблице 1. Данные были отсортированы по возрастанию значения концентрации пыли для удобства анализа.

Прежде всего, необходимо определить вид распределения, которому подчиняется массив полученных данных. Для проверки нормальности распределения прежде всего воспользуемся графическим способом: отобразим полученные данные в виде гистограммы. Для этого полученные значения необходимо разде-

лить на интервалы с определенным шагом, посчитать частоту встречаемости измеренных значений в каждом интервале, рассчитать вероятность попадания результата измерения в каждый интервал и получить ординату (высоту) каждого столбца гистограммы. Также для оценки соответствия распределения нормальному существует возможность проверки по критериям Колмогорова-Смирнова и Лиллиефорса с помощью аналитического пакета *Statistica 7*. Результат проверки представлен на рисунке 1.

Таблица 1 – Фрагмент массива результатов измерений параметров воздуха РЗ (составлено авторами)

№ п/п	Концентрация пыли, мг/м³	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Атмосферное давление, кПа	Скорость движения воздуха, м/с
1	205	6,3	91,96	34	1,0
2	205	6,4	91,97	33	1,4
3	206	6,5	91,97	35	1,1
...	...	...	...	...	...
23	210	6,7	92,06	34	1,4
24	210	6,6	92,07	35	1,7
25	211	6,7	92,08	33	1,6
...	...	...	...	...	...
43	214	6,7	92,19	34	1,8
44	215	6,4	92,20	32	2,0
45	215	6,8	92,20	32	1,9

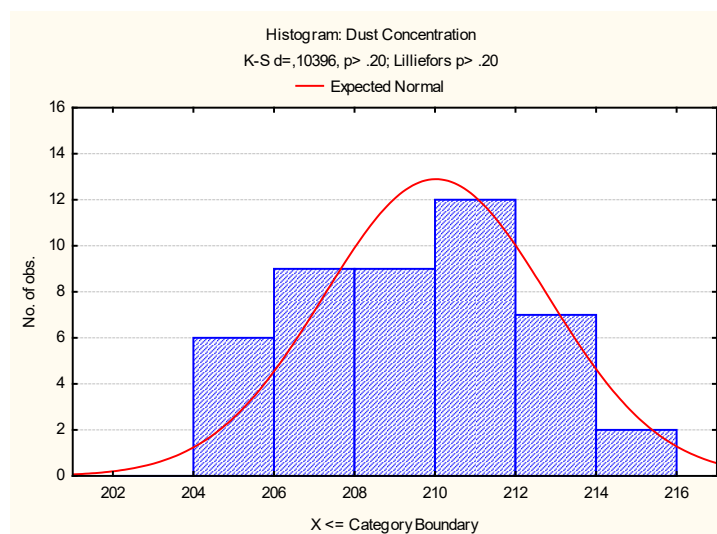


Рисунок 1 – Проверка нормальности распределения выборки (составлено авторами)

По результатам проверки в пакете *Statistica 7* были получены значения $p > 0,20$. Поскольку значение p (уровень значимости вероятности ошибочного принятия гипотезы о нормальности распределения) составляет более 0,05 (пороговое значение – $p > 0,05$), гипотеза о нормальности распределения принимается.

По гистограмме видно приблизительно нормальное распределение со смещением центра распределения. Для уточнения нормальности распределения по t -критерию Стьюдента воспользуемся значениями асимметрии и эксцесса. Асимметрия отражает степень отклонения середины распределения (пика) от центра распределения по горизонтальной оси.

Эксцесс характеризует степень отклонения вершины распределения по вертикальной оси (завышение или занижение вершины). Расчет значений асимметрии и эксцесса выборки по концентрации пыли осуществлен с помощью операционных возможностей *MS Excel*: использовались операторы «ЭКССЕСС» (для определения эксцесса) и «СКОС» (для определения асимметрии). По выборке со значениями концентрации пыли были получены следующие значения:

- Эксцесс $Ex = -0,922$;
- Асимметрия $As = -0,050$.

Далее производится расчет выборочных ошибок расчета асимметрии и эксцесса по соотношениям (1)

и (2) соответственно:

$$SAs = \sqrt{\frac{6}{n+3}}, \quad (1)$$

$$SEx = 2g\sqrt{\frac{6}{n+5}}, \quad (2)$$

где n – число элементов в выборке (число измерений).

Отсюда выборочные ошибки будут равны $SAs = 0,354$; $SEx = 0,693$.

Далее необходимо рассчитать фактическое значение t -критерия Стьюдента для асимметрии и для эксцесса как частное от деления значений асимметрии и эксцесса на их выборочные ошибки. Полученные расчетные данные сравниваются с табличными показателями t -критерия и делается вывод о нормальности распределения.

$$t_{\phi} = \frac{As}{SAs} = \frac{-0,05}{0,354} = -0,14.$$

$$t_{\psi} = \frac{Ex}{SEx} = \frac{-0,922}{0,693} = -1,33.$$

Справочное значение t -критерия Стьюдента (теоретическое) для вероятности ошибки статистического заключения не более 1% (для важных и точных измерений) составляет 2,7. Видно, что оба фактических значения по модулю не превышают критическое табличное значение, что говорит о нормальном распределении выборки.

Более того, числовые характеристики распределенной выборки показывают о близком к нормальному распределению данных: среднее арифметическое, геометрическое и гармоническое, мода и медиана приблизительно равны друг другу; максимальное и минимальное значения равноудалены от среднего; коэффициенты асимметрии и эксцесса меньше критического по модулю.

Таким образом, делается вывод о возможности применения параметрических методов оценки корреляции данных (при условии, что другие выборки также распределены нормально) (табл. 2).

Определение корреляционной связи запыленности воздуха и микроклиматических (климатических) параметров воздуха представлено на примере связи концентрации пыли и значения температуры воздуха (нормальное распределение, t -критерий

Стьюдента $-1,34$ и $-0,63$ при табличном 2,7).

Таблица 2 – Числовые характеристики выборки (составлено авторами)

№ п/п	Параметр		Значение
1	Среднее	арифметическое	210,0
		геометрическое	210,0
		гармоническое	209,9
2	Медиана		210,0
3	Мода		211,0
4	Максимальное		215,0
5	Минимальное		205,0

Для оценки степени корреляционной связи между параметрами использован коэффициент корреляции Пирсона, применяемый для оценки связей нормально распределенных величин. Коэффициент корреляции Пирсона рассчитывается по соотношению (3):

$$r_{xy} = \frac{n \cdot \sum(x_i \cdot y_i) - (\sum x_i \cdot \sum y_i)}{\sqrt{[n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \cdot \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}. \quad (3)$$

Величина рассчитанного коэффициента Пирсона r показывает силу или тесноту связи между исследуемыми параметрами: чем ближе значение r к 1, тем сильнее между параметрами связь. Если расчетный коэффициент Пирсона $r < 0,3$, то такая связь считается слабой; если $r > 0,7$, то связь считается сильной. Если r – в интервале от 0,3 до 0,7, то тесноту связи рекомендуется уточнять другими инструментами или увеличением выборки данных.

Знак коэффициента отражает характер связи между исследуемыми выборками: если знак коэффициента Пирсона «+», то связь называется положительной или прямой: при увеличении одного параметра, увеличивается и другой. Если знак рассчитанного коэффициента «-», то связь называется отрицательной или обратной: при увеличении одного параметра второй будет уменьшаться.

Для упрощения расчета коэффициента Пирсона проводятся вспомогательные вычисления, а все результаты сводятся в общую таблицу (табл. 3). Данные для таблицы были предварительно отсортированы по возрастанию концентрации пыли для удобства расчетов и восприятия (порядок не влияет на результат расчетов).

Таблица 3 – Вспомогательные расчеты для вычисления коэффициента Пирсона (составлено авторами)

№ п/п	Концентрация пыли, мг/м³ (x)	Температура воздуха, (y)	x*y	x*x	y*y
1	205	6,3	1291,5	42025	39,69
2	205	6,4	1312,0	42025	40,96
3	206	6,5	1339,0	42436	42,25
...	...	...	...	...	...
22	210	6,7	1407,0	44100	44,89
23	210	6,7	1407,0	44100	44,89
24	210	6,6	1386,0	44100	43,56
...	...	...	...	...	...
43	214	6,7	1433,8	45796	44,89
44	215	6,4	1376,0	46225	40,96
45	215	6,8	1462,0	46225	46,24
Сумма	9451	296,4	62255,4	1985261	1953,02

Тогда коэффициент корреляционной связи Пирсона между концентрацией пыли в воздухе рабочих зон и температурой воздуха по соотношению (3) будет равен:

$$r_{xy} = \frac{45 \cdot 62255,4 - 9451 \cdot 296,4}{\sqrt{[45 \cdot 1985261 - 9451^2] \cdot [45 \cdot 1953,02 - 296,4^2]}} = 0,3.$$

Таким образом видно, что между температурой воздуха и концентрацией пыли в воздухе существует умеренная прямая корреляционная связь: с ростом температуры концентрация пыли в воздухе также растет, но в значительно меньшей степени. Полученное значение коэффициента корреляции на границе слабой и умеренной сил связи не позволяет с уверенностью утверждать о характере взаимосвязи между параметрами и о надежности полученного результата.

Результаты определения коэффициента корреляции Пирсона по каждому из исследованных параметров представлены в матрице корреляции (рис. 2). По матрице видно, что факторы никак не связаны

друг с другом: корреляционная связь между независимыми величинами слабая, $r < 0,5$.

Используем полученные данные для построения регрессионной модели, отражающей влияние каждого фактора на отклик – концентрацию пыли в воздухе. Для этого воспользуемся прикладным программным пакетом *Statistica 7*, модуль – множественная регрессия. Множественная регрессия представляет собой математическую модель, включающую ряд исследуемых факторов и применяемую для прогноза значений отклика по изменениям независимых величин (рис. 3).

Фактор температуры воздуха имеет низкую достоверность, уровень его значимости ($p = 0,655$) превысил допустимые $p < 0,05$, то есть влияние температуры на концентрацию пыли определено как незначительное для построенной модели. Следовательно, температура воздуха в регрессионную модель не включается.

Пересчет параметров модели без учета фактора температуры примет вид согласно рисунку 4.

Correlations (Spreadsheet2)					
Marked correlations are significant at $p < ,05000$					
N=45 (Casewise deletion of missing data)					
Variable	Concentration	Temperature	Pressure	Humidity	Wind speed
Concentration	1,00	0,30	0,54	-0,52	0,71
Temperature	0,30	1,00	0,12	-0,15	0,36
Pressure	0,54	0,12	1,00	-0,09	0,35
Humidity	-0,52	-0,15	-0,09	1,00	-0,30
Wind speed	0,71	0,36	0,35	-0,30	1,00

Рисунок 2 – Корреляционная матрица (составлено авторами)

Regression Summary for Dependent Variable: Concentration (Sp						
R= ,84152936 R ² = ,70817166 Adjusted R ² = ,67898883						
F(4,40)=24,267 p<,00000 Std. Error of estimate: 1,5772						
N=45	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(40)	p-level
Intercept			-678,027	245,7117	-2,75944	0,008692
Temperature	0,041307	0,091636	0,892	1,9778	0,45077	0,654586
Pressure	0,335886	0,091092	9,846	2,6702	3,68732	0,000673
Humidity	-0,339350	0,089690	-0,981	0,2593	-3,78357	0,000507
Wind speed	0,477041	0,100262	5,389	1,1326	4,75795	0,000026

Рисунок 3 – Результаты регрессионного моделирования (составлено авторами)

Regression Summary for Dependent Variable: Concentration (Sp						
R= ,84064808 R ² = ,70668919 Adjusted R ² = ,68522742						
F(3,41)=32,928 p<,00000 Std. Error of estimate: 1,5618						
N=45	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(41)	p-level
Intercept			-671,585	242,9006	-2,76486	0,008496
Wind speed	0,491324	0,094194	5,550	1,0641	5,21606	0,000006
Humidity	-0,341425	0,088698	-0,987	0,2564	-3,84931	0,000407
Pressure	0,335656	0,090201	9,839	2,6441	3,72119	0,000596

Рисунок 4 – Данные скорректированной регрессионной модели (составлено авторами)

В столбце "B" указаны коэффициенты модели: свободный и угловые при каждом исследованном факторе. Последний столбец $p\text{-level}$ отражает статистическую значимость каждого элемента модели. В шапке таблицы " R^2 " – коэффициент детерминации R^2 ,

F – критерий Фишера и его уровень значимости.

Результатом регрессионного анализа является модель множественной линейной регрессии:

$$C = -671,858 + 5,55 \cdot V - 0,987 \cdot H + 9,839 \cdot P; (R^2 = 0,71),$$

где C – концентрация пыли; V – скорость движения

воздуха; H – относительная влажность воздуха, P – атмосферное давление.

Регрессионная модель может использоваться для предсказания величины искомой зависимой переменной (отклика) по результатам измерения независимых величин (рис. 5). Используем значения по первой строке таблицы 1: $V = 1$ м/с, $H = 34\%$, $P = 91,96$ кПа. Тогда по модели значение составит:

$$C = -671,858 + 5,55 \cdot 1 - 0,987 \cdot 34 + 9,839 \cdot 91,96 = 205,21.$$

Расчетное значение согласуется с измеренным (205 мг/м^3). С учетом 95% доверительного интервала истинное значение будет находиться в интервале:

$$C = 204,03 \text{ мг/м}^3 \div 204,03 \text{ мг/м}^3$$

Predicting Values for (Spreadsheet variable: Concentration)			
Variable	B-Weight	Value	B-Weight * Value
Wind speed	5,550250	1,00000	5,550
Humidity	-0,987024	34,00000	-33,559
Pressure	9,839084	91,96000	904,802
Intercept			-671,585
Predicted			205,208
-95,0%CL			204,030
+95,0%CL			206,387

Рисунок 5 – Результаты расчета по регрессионной модели (составлено авторами)

Обсуждение. Вопрос наличия статистической связи между концентрацией пыли в воздухе и его микроклиматическими параметрами занимают ученых всего мира последние несколько десятилетий. Возможность с некоторой точностью прогнозировать запыленность воздуха в конкретном месте при заданных контролируемых факторах позволило бы обеспечить куда более безопасные и комфортные условия для работников за счет своевременного внедрения эффективных мероприятий по охране труда.

В ряде рассмотренных научных, например, [15] работ авторы предлагают к применению непараметрические методы оценки корреляционной связи между запыленностью и микроклиматом (климатом), однако непараметрические методы куда менее требовательны к анализируемым данным, а также обладают меньшей статистической мощностью и надежностью, что ставит под сомнение результат анализа. В другой работе [16] авторами оценивается значимость отдельных элементов из выборочной совокупности по собственному числу, но оно не дает полноценного представления о взаимосвязи фактора и отклика. В исследовании [18] ученый обоснованно указывает на взаимосвязь концентрации пыли и относительной влажности воздуха, однако не берет во внимание понятие влагосодержания, величина которого более репрезентативна в отношении увлажнения пылящих поверхностей.

Видно, что результаты разных исследований по данной проблеме отличаются и могут отражать противоположные результаты. Важно заметить, что

результаты могут быть разными по ряду причин: разные климатические условия (флуктуация температуры воздуха, значения максимальных и минимальных температур, значения скоростей ветра и розы ветров), влияние других учтенных и неучтенных факторов (нестационарные источники тепла, аэрозоля). Поэтому в исследованиях по рассматриваемой проблеме важно выделять репрезентативную выборочную совокупность, правильно оценивать характер распределения и учитывать факторы, оказывающие прямое и косвенное влияние на результат оценки.

В результате проведенного исследования было установлено, что между запыленностью воздуха и микроклиматическими параметрами существует корреляционная связь. Это означает, что состояние воздуха в рабочей зоне способно оказывать влияние на интенсивность пылеобразования и пылеосаждения и, таким образом, учет этих параметров может быть важен при оценке пылевой нагрузки на персонал горных предприятий и рабочих мест, занятых в условиях повышенной запыленности воздуха.

По данным корреляционного анализа было установлено, что в большей степени на запыленность воздуха влияет скорость движения воздуха ($r = 0,71$), среднее воздействие оказывает атмосферное давление ($r = 0,54$) и относительная влажность воздуха ($r = -0,52$). Воздействие температуры считается незначительным и не учитывается в дальнейших расчетах.

Сильная связь запыленности со скоростью может быть обоснована высокой степенью ветровой эрозии открытых пылящих поверхностей (технологических автодорог, отвалов). При повышенной ветровой нагрузке концентрация пыли, согласно анализу, увеличивается, однако также необходимо учитывать, что улучшается эффективность разбавления вредных (аэрозоля) в рабочей зоне. В данном случае значимую роль будет играть роза ветров: воздух может нагонять свежую струю со стороны или приносить пылевые массы с других источников пыли. Относительная влажность воздуха может оказывать влияние на увлажненность поверхности почвы и пылящей поверхности (технологической дороги), в связи с чем может увеличиваться адгезия между мельчайшими частицами, таким образом снижается интенсивность пылевыноса. Более того, с увеличением влажности воздуха повышается слипаемость витающих в воздухе пылевых частиц в результате их столкновения (Эоловы потоки, турбулентные воздушные потоки приводят к сталкиванию пылинок), что значительно повышает эффективность технических мероприятий по пылеподавлению взвешенной пыли, так как увеличивается размер отдельных частиц. Более того, время самоосаждения пыли снижается за счет увеличения массы их агломератов. Знак « $\rightarrow$ » говорит об обратном характере связи между параметрами. Атмосферное давление также оказывает косвенное влияние на запыленность воздуха, но вопрос механизма воздействия

может быть предметом глубокого аэрологического исследования, учет факторов, на которые может воздействовать атмосферное давление достаточно сложен: устойчивость приземного слоя атмосферы, направление и сила ветров, характер движения воздушных потоков, сорбционная способность отдельных пылинок.

Полученная регрессионная модель с незначительным отклонением позволяет прогнозировать запыленность воздуха по заданным параметрам воздуха. Стоит отметить, что на запыленность воздуха и интенсивность образования пыли влияет множество других факторов помимо микроклимата, например, технологический процесс – источник (причина) пылевыноса, генезис пылевой массы, дисперсный состав, физико-химические свойства дисперсного материала, наличие дополнительных источников пыления. Поэтому представленная модель недостаточно информативна для точного прогноза запыленности воздуха в текущем состоянии, однако может быть использована для уточнения исследуемых данных или как основа для более репрезентативного математического выражения зависимости, что может стать фундаментом для разработки рекомендаций по принятию мер по охране труда [25]. Коэффициент детерминации представленной модели составляет $R^2 = 0,71$, что достаточно для применения модели в прикладных целях, но модель является недостаточно информативной для фундаментальных теоретических исследований и требует уточнений.

Выводы. Проблема повышенной запыленности на рабочих местах и особенно на предприятиях минерально-сырьевого комплекса остается острой и актуальной, затрагивающей многие аспекты человеческой жизнедеятельности: социальный, экономический, экологический и другие. По этой причине множество экспертов и ученых со всего мира в своей деятельности направляют много сил на поиск решения этой проблемы для оздоровления рабочих мест по фактору АПФД.

В результате исследования была установлена корреляционная связь между концентрацией пыли в воздухе рабочей зоны на горнорудном карьере и микроклиматическими параметрами воздуха, такими как температура, относительная влажность, скорость движения воздуха и атмосферное давление; разработана и представлена регрессионная модель, учитывающая влияние параметров воздуха на изменение концентрации пыли.

Предложенная модель оценки статистических связей между концентрацией пыли в воздухе рабочих зон и микроклиматическими параметрами воздуха может позволить точнее рассчитывать пылевую нагрузку на персонал, занятый в условиях интенсивного воздействия производственного фактора АПФД, внедрять адресные мероприятия по охране труда и своевременно проводить профилактику профессиональных заболеваний пылевой этиологии. Предложенная регрессионная модель может служить

основой для разработки более точной математической зависимости концентрации пыли от влияющих факторов с целью прогноза запыленности воздуха на конкретных технологических этапах и процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Туманов М.В., Гендлер С.Г., Кабанов Е.И., Родионов В.А., Прохорова Е.А. Индекс персонального риска, как перспективный инструмент управления человеческим фактором в охране труда // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-1. – С. 230-247. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_230.
2. Shabani, S., Bachwenkizi, J., Mamuya, S.H., Moen B.E. The prevalence of occupational injuries and associated risk factors among workers in iron and steel industries: a systematic review and meta-analysis // BMC Public Health. 2024. – №24. 2602. – DOI: 10.1186/s12889-024-20111-w.
3. Новикова И.В. Стратегирование развития трудовых ресурсов: основные элементы и этапы // Стратегирование: теория и практика. – 2021. – Т. 1. – № 1. – С. 57-65. DOI: 10.21603/2782-2435-2021-1-1-57-65.
4. Евхута, Н.А., Жарикова О.С., Зильбербанд Н.Ю. Государственная политика РФ в сфере развития человеческого капитала на современном этапе // Экономические науки. – 2023. – № 222. – С. 142-146. DOI: 10.14451/1.222.142. EDN HOYVEW.
5. Litvinenko V.S., Bowbrick I., Naumov I.A., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals // Journal of Cleaner Production. – 2022. – №338. – 130530. – С. 1-9. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
6. Збарский А.М. Система развития человеческого капитала как основа устойчивого развития отраслей // Креативная экономика. – 2023. – Т. 17. – № 6. – С. 2097-2114. – DOI: 10.18334/ce.17.6.117864.
7. Егорова А.М., Луценко Л.А., Сухова А.В., Колюка В.В., Федорович Г.В. К вопросу оценки профессионального риска заболеваний пылевой этиологии. Здравоохранение Российской Федерации. – 2021. – №65(4). – С. 354-358. mDOI: 10.47470/0044-197X-2021-65-4-354-358.
8. Корнев А.В., Ледяев Н.В., Кабанов Е.И., Корнева М.В. Оценка прогнозной запыленности в забоях угольных шахт с учетом особенностей смачиваемости угольной пыли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 115-134. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_115.
9. Hendryx M., Islam M.S., Dong G.-H., Paul, G. Air Pollution Emissions 2008–2018 from Australian Coal Mining: Implications for Public and Occupational Health // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. – № 17(5). 1570. – DOI: 10.3390/ijerph17051570.
10. Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Ухабов В.М. Влияние вредных физических факторов и производственной пыли на изменения некоторых биохимических и функциональных показателей состояния сердечно-сосудистой системы и органов дыхания у работников, занятых подземной добычей руды // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – №59 (10). – С. 920-925. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-11-920-925.
11. Титенок, А.В., Амелин А.В., Каценко Е.Н. Производственная пыль // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4(80). – С. 62-72. EDN HGAABW.
12. Новожилова А.А., Герегей А.М., Меркулова А.Г. Особенности исследования профессионального отложения в физиологии труда // Медицина труда и промышленная экология. – 2022. – №62(4). – С. 238-246. – DOI: 10.31089/1026-9428-2022-62-4-238-246.
13. Строкова В.В., Рязанова А.Ю., Маркова И.Ю., Степаненко М.А., Ишмухаметов Э.М. Оценка эффективности водных пылеподавляющих эмульсий на основе акриловых и алкидных полимеров // Записки Горного института. – 2024. – Т. 270. – С. 941-949. EDN EHNKHL.
14. Gang L., Jinhua H., Shiqiang C. A review of dust control/removal methods in metal mines in China // Powder Technology. 2023. – Т. 430. – 119035. – DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119035.

15. Zender-Świercz E., Galiszewska B., Telejko M., Starzomska M. The effect of temperature and humidity of air on the concentration of particulate matter - PM2.5 and PM10 // *Atmospheric Research*. – 2024. – T. 312. – 107733. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107733.
16. Ziernicka-Wojtaszek A., Zuśka Z., Kopcińska J. Assessment of the Effect of Meteorological Conditions on the Concentration of Suspended PM2.5 Particulate Matter in Central Europe // *Sustainability*. – 2024. – №16(11). – 4797. – DOI: 10.3390/su16114797.
17. Birim N.G., Turhan C., Atalay A.S., Gokcen Akkurt G. The Influence of Meteorological Parameters on PM10: A Statistical Analysis of an Urban and Rural Environment in Izmir/Türkiye // *Atmosphere*. – 2023. – №14(3). – 421. – DOI: 10.3390/atmos14030421.
18. Вильк М.Ф., Сачкова О.С., Леванчук Л.А., Латынин Е.О. Особенности оценки профессионального риска здоровью работников, контактирующих с аэрозолями мелкодисперсных пылевых частиц // *Анализ риска здоровью*. – 2020. – №4. – С. 106-112. – DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.12.
19. Yaping S. Adhesion theory and model for air humidity impact on dust emission // *Aeolian Research*. – 2024. – T. 66. – 100898. – DOI: 10.1016/j.aeolia.2024.100898.
20. Cattonar L., Suh J., Nursey-Bray M. Coal dust pollution in regional Australian coal mining towns: Social License to Operate and community resistance // *Geoforum*. – 2024. – T. 151. – 104008. – DOI: 10.1016/j.geoforum.2024.104008.
21. Requia W.J., Jhun I., Coull B.A., Koutrakis P. Climate impact on ambient PM2.5 elemental concentration in the United States: A trend analysis over the last 30 years // *Environment International*. – 2019. – T. 131. – 104888. – DOI: 10.1016/j.envint.2019.05.082.
22. Ядгаров М.Я., Кузовлев А.Н., Берикашвили Л.Б., Баева А.А., Лихванцев В.В. Важность оценки закона распределения данных: теория и практическое руководство // *Анестезиология и реаниматология*. – 2021. – №2. – С. 136-142. – DOI: 10.17116/anaesthesiology2021021136.
23. Баврина, А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа // *Медицинский альманах*. – 2021. – № 3(68). – С. 70-79. – EDN TPSSIX.
24. Каранина Е.В., Максимова Н.А. Оценка рисков экономической безопасности промышленных предприятий посредством разработки модели множественной регрессии // *Проблемы анализа риска*. – 2022. – №19(2). – С. 30-38. – DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-2-30-38.
25. Смирняков В.В., Родионов В.А., Смирнякова В.В., Орлов Ф.А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // *Записки Горного института*. – 2022. – T. 253. – С. 71-81. – DOI: 10.31897/PMI.2022.12.

Статья поступила в редакцию 04.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 614.841

EDN: XQCUZC

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ КАК МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

© Авторы 2025

SPIN: 15626835

AuthorID: 855747

ORCID: 0000-0001-7499-2821

Scopus ID: 57209220221

МАНАЕВА Алина Рамзиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и материаловедения

Академия гражданской защиты МЧС России

(141435, Россия, Московская область, г. о. Химки, мкр. Новогорск; e-mail: chem88@yandex.ru)

SPIN: 34412081

AuthorID: 756816

ORCID: 0000-0002-3384-2007

Scopus ID: 57224406714

МОРОЗОВ Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики

Академия гражданской защиты МЧС России

(141435, Россия, Московская область, г. о. Химки, мкр. Новогорск; e-mail: morozov-2006@yandex.ru)

SPIN: 1654-0669

AuthorID: 57770

ORCID: 0000-0002-3384-2007

Scopus ID: 57194012635

ШАРИФУЛЛИНА Лилия Ринатовна, кандидат химических наук,

доцент, заведующий кафедрой химии и материаловедения

Академия гражданской защиты МЧС России

(141435, Россия, Московская область, г. о. Химки, мкр. Новогорск; e-mail: alishari@yandex.ru)

Аннотация. При транспортировке нефти по магистральным трубопроводам возникают газопроявления, переходящие в открытые газовые фонтаны и пожары, а также испарения нефти, что является причиной развития чрезвычайных ситуаций. Повышение коррозионного износа и снижение надежности трубопроводов происходит по причине подогрева и сжигания нефти для уменьшения вязкости транспортируемых углеводородов. Цель исследования: поиск метода снижения вязкости транспортируемых нефтепродуктов по магистральным трубопроводам, который позволит снизить коррозионный износ, повысит надежность трубопровода и минимизирует риск развития пожароопасной ситуации. Задачи: анализ причин развития пожаров при транспортировке нефти по трубопроводам; теоретический обзор имеющихся методов снижения вязкости нефти, их преимущества и недостатки; разработка альтернативного метода подогрева нефтепроводов, который позволит минимизировать риск развития пожароопасной ситуации на участке магистрального трубопровода. В работе изучается возможность сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева нефтепродуктов для минимизации выпадения асфальто-парафиновых отложений при их транспортировке по трубопроводам. Это позволит защитить трубопровод от закупорок в условиях северного климата, а также повысить надежность трубопровода и снизить его коррозионный износ. Предлагается применять полосковый волновод, расположенный внутри трубопровода, в качестве источника электромагнитного излучения. Расчетами доказано, что если устанавливать секции СВЧ нагрева через каждые 4-7 км вдоль трубопровода, по которому движется поток нефтепродуктов с объемным расходом жидкости 2,78 м³/с (10000 м³/час), то среднеобъемная температура нефти не будет опускаться ниже 20°C. Данная технология более эффективна по сравнению с иными способами подогрева транспортируемой нефти. Это позволит избежать закупорки трубопровода и повысит надежность магистрального трубопровода за счет уменьшения коррозионного износа. Отсутствие отложений нефтепродуктов снизит риск развития газопоявлений, переходящих в открытые газовые фонтаны и пожары.

Ключевые слова: пожарная безопасность, нефтепродукты, легковоспламеняющиеся жидкости, электромагнитный нагрев, магистральный трубопровод, вязкость, теплопотери, коррозия.

HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC PROTECTION OF PIPELINES AS A METHOD OF INCREASING FIRE SAFETY DURING TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS

©The Author(s) 2025

MANAEVA Alina Ramzilevna, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of Chemistry and Materials Science

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia

(141435, Russia, Moscow region, Khimki, MD. Novogorsk; e-mail: chem88@yandex.ru)

MOROZOV Nikolay Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor,

professor of the Department of Physics
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia
(141435, Russia, Moscow region, Khimki, MD. Novogorsk; e-mail: morozov-2006@yandex.ru)
SHARIFULLINA Liliya Rinatovna, phd in chemical sciences, associate professor,
head of the Department of Chemistry and Materials Science
Civil Defence Academy EMERCOM of Russia
(141435, Russia, Moscow region, Khimki, MD. Novogorsk; e-mail: alishari@yandex.ru)

Abstract. When transporting oil through main pipelines, gas phenomena occur, leading to open gas fountains, fires, and oil evaporation. This causes emergency situations. Corrosion wear and pipeline reliability are increased due to heating and burning of oil, which reduces the viscosity of hydrocarbons transported. The aim of the study is to find a way to reduce the viscosity of petroleum products transported through main pipelines. This would reduce corrosion wear, improve pipeline reliability, and minimize fire hazards. Objectives: analysis of causes of fires during oil transportation via pipelines; theoretical review of methods to reduce oil viscosity, including their advantages and disadvantages; development of an alternative method for heating oil pipelines that minimizes fire risk on the main section of the pipeline. The paper studies the possibility of ultra-high frequency electromagnetic heating of petroleum products to minimize the deposition of asphalt-paraffin deposits during their transportation through pipelines. This will protect the pipeline from blockages in the northern climate, as well as increasing the reliability of the pipeline and reducing its corrosive wear. It is proposed to use a strip waveguide located inside the pipeline as a source of electromagnetic radiation. Calculations have shown that if microwave heating sections are installed every 4-7 km along a pipeline through which a flow of petroleum products at a rate of 2.78 m³/s (10,000 m³/h) passes, the average oil temperature will remain above 20 °C. This technology is more efficient than other methods for heating transported oil, avoiding clogging of pipelines and increasing the reliability and durability of the main line by reducing corrosion. The absence of deposits of petroleum products reduces the risk of gas events developing into open gas fountains and fires.

Keywords: fire safety, petroleum products, flammable liquids, electromagnetic heating, main pipeline, viscosity, heat loss, corrosion.

Для цитирования: Манаева А.Р. Высокочастотная электромагнитная защита трубопроводов как метод повышения пожаробезопасности при транспортировке нефтепродуктов / А.Р. Манаева, Н.Н. Морозов, Л.Р. Шарифуллина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1 (69). – С. 180-185. – EDN: XQCUZC.

Введение. Вопросы обеспечения пожарной безопасности на опасных производственных объектах трубопроводного транспорта [1] приобретают в последнее время все большую актуальность ввиду увеличения объемов добываемого сырья и все большей удаленности нефтяных и газовых месторождений от населенных пунктов. При этом наибольшее число мест добычи углеводородного сырья приходится на северные территории.

При транспортировке углеводородного сырья возникают газопроявления, переходящие в открытые газовые фонтаны и пожары, происходит это по причине повреждения участка трубопровода [2]. Довольно часто это может сопровождаться разливами и образованием газо- и паровоздушного облака из нефтепродуктов, способных к воспламенению и взрыву вдоль магистрального трубопровода [3]. Источниками развития ЧС также может являться коррозия трубопроводов, износ оборудования [4]. При этом определение места и объема потерь углеводородов при авариях, связанных с повреждениями трубопроводов и последующих разливах [5] представляет собой сложную техническую задачу.

В связи с вышеизложенными обстоятельствами необходимо проводить мониторинг изменения факторов, влияющих на износ трубопроводов и внедрять систему превентивных мероприятий, направленных на предупреждение аварий и несчаст-

ных случаев. К числу таких факторов относится предупреждение коррозионного износа трубопровода [6]. Это требует специальных способов защиты нефтепроводов от повреждений, вызванных коррозией металла [7].

Пожар на нефтяных и газовых месторождениях, а также местах транспортировки углеводородного сырья, является чрезвычайной ситуацией, которая может приводить к значительному материальному ущербу, а также создавать угрозу жизни или наносить вред здоровью человека [8].

Освоение углеводородных ресурсов на Крайнем Севере является сложной технической задачей [9] ввиду суровых природно-климатических условий и строительства трубопроводов высокой протяженности, так как в районах Севера почва имеет отрицательную температуру и вечномёрзлые грунты [10]. Существуют различные методы уменьшения вязкости транспортируемой нефти, в частности подогрев нефти до 80-90°C, однако это приводит к увеличению образования тиосоединений и повышению коррозионной активности перекачиваемой нефти, что в конечном итоге приведет к преждевременному износу трубопровода, а это потребует применения дополнительных мер защиты трубопроводного транспорта от коррозии [11]. Одним из направлений обеспечения безопасности является создание методов получения надежного и дол-

говечного трубопровода с внутренним и наружным покрытиями [12]. Имеются работы по применению гладкостного силикатно-эмалевого и порошкового эпоксидного покрытия для предупреждения выпадения асфальто-смоло-парафиновых отложений из транспортируемой по нефтепроводу нефти [13], что также доказало свою эффективность, однако является экономически и трудозатратным мероприятием. В процессе транспортировки нефтепродуктов трубопроводами происходит их охлаждение в результате теплообмена с окружающей средой, что при низких температурах может привести к увеличению вязкости продуктов вплоть до их затвердевания. Шельфовая нефть, например, из месторождения Приразломное не вытекает из канистры уже при 0°C.

Цель исследования: поиск метода снижения вязкости транспортируемых нефтепродуктов по магистральным трубопроводам, который позволит снизить коррозионный износ, повысит надежность технических систем и минимизирует риск развития пожароопасной ситуации.

Задачи:

- анализ причин развития пожаров при транспортировке нефти по трубопроводам;
- теоретический обзор имеющихся методов снижения вязкости нефти, их преимущества и недостатки;
- разработка альтернативного метода подогрева нефтепроводов, который позволит минимизировать риск развития пожароопасной ситуации на участке магистрального трубопровода.

Методология. Современные методы подогрева нефтепроводов, основанные на использовании жаровых труб, имеют следующие недостатки: местный перегрев и нарушение структуры потока [14]. Также для снижения вязкости транспортируемой нефти применяют ингибиторы. Например, в системе промысловых трубопроводов для подавления коррозии и эрозии применяют многофункциональный реагент на основе технического фосфатида и моноэтаноламина [15]. Применение ингибиторов позволяет снизить гидравлические потери и повысить надежность трубопроводного транспорта [16], однако данный метод экономически не целесообразен. Есть метод, в котором предлагается смешивание вязкой нефти с легкой фракцией в системе транспортировки, однако, смешивание с легкой нефтью не всегда возможно из-за отсутствия легкой нефти на промысле. При этом именно месторождения плотной, высоковязкой, тяжелой и воскообразной нефти приобретают все большее значение в мировой экономике [17].

Резюмируя, можно выделить следующие основные пути для снижения вязкости нефти при движении по трубопроводам:

1. Подогрев нефти в нефтепроводе. Недостатком метода является повышение коррозионной активности транспортируемой среды и износа оборудования.

2. Применение силикатно-эмалевого порошкового эпоксидного покрытия для предупреждения выпадения асфальто-смоло-парафиновых отложений. Этот метод трудо- и экономически затратен.

3. Применение ингибиторов для снижения вязкости нефти. Этот метод требует больших финансовых вложений и не всегда оправдывает их.

4. Смешивание нефти с высокой вязкостью с нефтью из легких фракций в системе транспортировки. Метод нельзя применять в местах, где добывается только высоковязкая нефть и отсутствуют легкие фракции нефти типа петролейного эфира.

Интересны изобретения, которые предусматривают комбинированную обработку сырья, включающую воздействие ультразвуковыми колебаниями с частотой излучения $22 \pm 10\%$ кГц и мощностью 2–4 кВт и магнитным полем, создаваемым постоянными магнитами с индукцией 1,02 Тл, и электромагнитным излучением с индукцией 0,1–0,3 Тл [18].

Основной задачей исследования является разработка альтернативного метода подогрева нефтепроводов, основанного на электромагнитном излучении. Данный метод избежал бы указанных недостатков и мог бы быть применим в случаях, когда легкая нефть недоступна [19].

Воздействие на нефть с высокой плотностью в трубопроводах с применением ультразвуковой энергии и высокочастотной электромагнитной энергии имеют как свои преимущества, так и ограничения, которые должны быть учтены при разработке эффективных методов обработки нефтепродуктов при их транспортировке трубопроводами. Магистральные трубопроводы считаются потенциальным источником угрозы, аварии в которых связаны с разливами нефти, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду [20].

Для того чтобы избежать асфальто-смоло-парафиновых отложений при транспортировке нефти трубопроводами или свести их к минимуму в условиях низких температур, предлагаем ввод сверхвысокочастотной (СВЧ) электромагнитной энергии в трубопровод с помощью компактного волновода, расположенного на внутренней поверхности трубопровода (рис. 1).

У полосковой линии имеется два электрода: заземленным электродом является металлическая труба, потенциальным электродом – медная полоса в виде спирали, расположенная на внутренней поверхности диэлектрической вставки в трубопровод из радиопрозрачного материала с малым тангенсом угла потерь на СВЧ, например, из тефлона или керамики.

Результаты. Подвод СВЧ энергии в трубопровод целесообразно осуществить с помощью коаксиального ввода, вмонтированного в отверстие в трубопроводе с сопротивлением 50 Ом [19]. В предположении малой связи СВЧ поля с потоком нефти на длине, равной длине волны в волноводе,

положив относительную диэлектрическую проницаемость подложки $\varepsilon = 2$ (фторопласт), имеем отношение $W/h = 3,26$, здесь W – ширина полоскового потенциального электрода, h – толщина

диэлектрической подложки. Для того, чтобы избежать взаимное влияние витков, устанавливаем расстояние между ними не менее $5W$, как показано на рисунке 2.

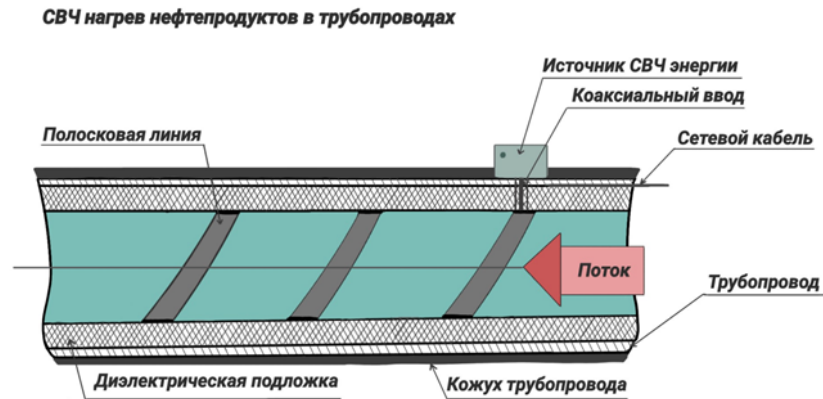


Рисунок 1 – Система взаимодействия для СВЧ нагрева нефтепродуктов при их транспортировке трубопроводами

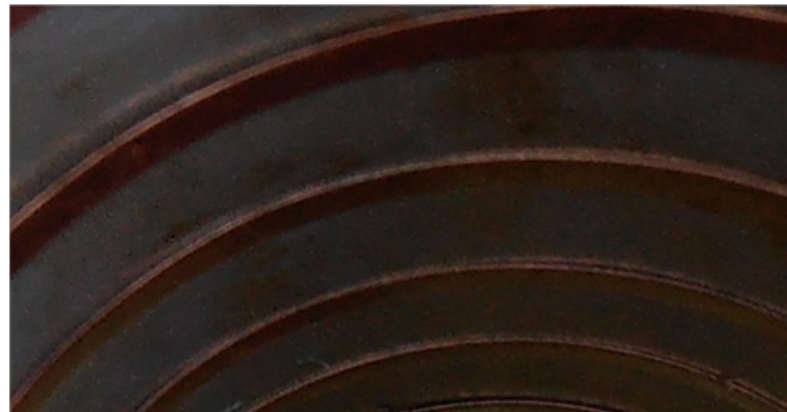


Рисунок 2 – Фрагмент фотографии экспериментальной установки (внутренняя часть диэлектрической трубы с медным потенциальным электродом полоскового волновода в виде спирали)

Для того чтобы предотвратить выпадение асфальто-парафиновых отложений и избежать закупорок в магистральных трубопроводах, необходимо оценить количество энергии, необходимой для поддержания среднеобъемной температуры в трубопроводе порядка 20°C [21].

Мощность $N_{тр}$ выделения теплоты за счет работы сил трения на длине трубопровода L :

$$N_{тр} = Q \cdot \Delta P = 8\eta L Q^2 / \pi R^4, \quad (1)$$

где Q – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

R – внутренний радиус трубопровода;

ΔP – падение давления на длине L ;

η – динамическая вязкость нефти.

Если на длине L трубопровода имеется один источник СВЧ энергии, например, магнетрон М-177, имеющий выходную мощность $N_{м} = 75$ кВт, то мощность тепловыделения в потоке нефти составит $(N_{тр} + N_{м})$, которую можно приравнять к потоку тепла через стенку трубопровода G .

Поток тепла через стенку трубопровода ($N_{и}$) будет определяться коэффициентом теплоотдачи α , теплопроводностью стали λ ст и кожуха трубо-

провода $\lambda_{к}$.

Уравнение подобия имеет вид:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} \quad (2)$$

Re находим делением произведения средней скорости потока и внутреннего диаметра трубопровода на кинематическую вязкость нефти. Pr представляет собой отношение кинематической вязкости к температуропроводности.

Обсуждение. В расчетах принимали следующие теплофизические показатели нефти (подобная добывается на Западном Сургутском месторождении): плотность нефти $\rho = 885$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu = 41,6$ сСт ($41,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с) при 20°C . В этой нефти плотность является средней, но вязкость высокая. Применяя методику расчёта по плотности, представленной в [16], получаем теплопроводность нефти при той же температуре $\lambda_{и} = 0,110$ Вт/м*К, а теплоемкость $C = 1910$ Дж/кг*К, заглубление трубопровода составляет 80 см от края трубопровода. В работе [22] предлагается способ транспортировки вязких нефтепродуктов, обеспечивающий их высокую среднюю температуру и текучесть без исполь-

зования теплоизоляции.

Наиболее распространенный внешний диаметр стальной трубы $d_1=1020$ мм (ГОСТ 20295-85 Трубы стальные сварные для магистральных трубопроводов), используемый в строительстве магистральных высокопроизводительных трубопроводов. При толщине стенки $\delta_{ст}=20$ мм имеем внутренний диаметр $d_2=980$ мм. Применяем теплоизолированные трубы с большой толщиной утеплителя из ППУ (пенополиуретана) $\delta_{пу}=120$ мм с теплопроводностью $\lambda_{пу}=0,030$ Вт/м*К [23], что подходит для территорий Крайнего Севера и приравненных к ним территорий. Внешний диаметр трубы составляет 126 см.

Определим длину трубопровода, в которой может поддерживаться среднееобъемная температура порядка 20°C , за счет работы одной СВЧ секции с источником на основе магнетрона М-177. В уравнении (2) множитель Михеева ($Pr_{жс} / Pr_{ст}$) 0.25 примем равным 1, характеризует поле тепловых величин потока жидкости при температуре стенки резервуара. Найдём значение Nu и определим показатель коэффициента теплоотдачи α от нефтепродукта к стенке стальной трубы. Используя значения α , теплопроводности стали $\lambda_{ст}=51,7$ Вт/м*К и теплопроводности ППУ $\lambda_{пу}=\lambda_k$, определим полное тепловое сопротивление на единицу длины трубопровода по формуле:

$$R = \frac{1}{\pi d_2 \alpha} + \frac{\delta_{ст}}{\pi d_2 \lambda_{ст}} + \frac{\ln\left(\frac{D}{d_1}\right)}{2\pi \lambda_{пу}} = 1,13 \text{ м} \cdot \text{K/Вт} \quad (3)$$

Затем уточним температуру стенки трубопровода со стороны нефти. Для этого, используя полученное тепловое сопротивление, найдем значение линейной плотности теплового потока и по нему определим температуру стенки трубопровода со стороны нефти. Получим множитель Михеева ($Pr_{жс} / Pr_{ст}$) 0.25, определив предварительно критерий Прандтля жидкости при температуре стенки. Однако это уточнение дало изменение теплового сопротивления только в четвертом знаке.

Тепловое излучение G от нефтепродукта:

$$G = (\Delta t \cdot L) / R \quad (4)$$

где $\Delta t = 30^\circ\text{C}$ – температурная разница между нефтепродуктом и окружающей средой.

В формуле (1) объемный расход нефти в трубопроводе примем $Q = 2,78$ м³/с. Этот расход получен в предположении, что на насосной станции прокачивает нефть насос НМ 10000-210 с номинальной подачей 10000 м³/час.

Определили, что длина трубопровода L , на которой одна СВЧ секция поддерживает среднееобъемную температуру на уровне 20°C , составляет порядка 4,01 км. Данные расчеты справедливы для северо-восточной части районов Крайнего Севера и приравненных к ним территорий, где самые низкие температуры почвы на глубине 1,4 м. В западной части температура грунта не ниже 0°C . Тогда L будет составлять 7 км [23]. В этом случае длина L близка к 7 км.

В работе представлена возможность СВЧ разогрева нефти в магистральных трубопроводах в условиях низких температур окружающей среды, благодаря чему не будет наблюдаться градиента температур в жидкости и минимизируется выпадение асфальто-парафиновых отложений. Это позволит избежать закупорки трубопровода и повысит надежность магистрального трубопровода за счет уменьшения коррозионного износа.

Расчетами показано, что при установлении секций СВЧ нагрева с интервалом 4–7 км вдоль трубопровода с объемным расходом жидкости 2,78 м³/с (10000 м³/час) средняя температура нефти не упадет ниже 20°C .

Все сказанное дает уверенность в возможной реализации такого подхода. Или, по крайней мере, позволяет считать полезными и актуальными исследования в данном направлении.

Выводы. Транспортировка трубопроводами нефти и газоконденсата в северных широтах сопряжена с рядом проблем, среди которых наиболее сложной с точки зрения ее решения является закупорка трубопровода асфальто-парафиновыми отложениями и газогидратами. При транспортировке углеводородного сырья возникают газопроявления, переходящие в открытые газовые фонтаны и пожары, происходит это по причине повреждения участка трубопровода. Проанализированы методы уменьшения вязкости нефти: подогрев нефти в нефтепроводе, применение силикатно-эмалевых порошковых эпоксидных покрытий для предупреждения выпадения асфальто-смоло-парафинистых отложений, применение ингибиторов, смешивание вязкой нефти с легкой в системе транспортировки. Каждый из методов обладает существенными недостатками, поэтому возникла необходимость в разработке альтернативного метода подогрева нефтепроводов.

Предлагается применять полосковый волновод, располагающийся внутри трубопровода, который будет служить источником электромагнитного излучения. Расчетами доказано, что если устанавливать секции СВЧ нагрева с расстоянием в 4–7 км вдоль трубопровода с объемным расходом жидкости 2,78 м³/с (10000 м³/час), то среднееобъемная температура нефти не будет опускаться ниже 20°C . Предлагаемое решение позволит избежать закупорки трубопровода и повысит надежность технических систем за счет уменьшения коррозионного износа. Это, в свою очередь, снизит риск развития газопоявлений, переходящих в открытые газовые фонтаны и пожары, происходящих по причине повреждения участка трубопровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кустышев А.В., Малюшин Н.А., Гульцев В.Е. Управление производством при ликвидации нефтегазовых фонтанов и пожаров в системе добычи и транспортировке углеводородов на месторождениях Западной Сибири// Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 1 (91). – С. 107-113.

2. Сукало, Г.М. Промышленная безопасность объектов трубопроводного транспорта: учебник. / Г.М. Сукало. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 284 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=706880> (дата обращения: 17.01.2025). – Библиотеч. с. 267-274. – ISBN 978-5-4499-3986-9. – DOI 10.23681/706880. – Текст: электронный.
3. Koval'skii, B.I. System for Capturing Vapors of Oil and Oil Products in the Course of Loading and Unloading Operations and in Transportation / B.I. Koval'skii, Y.N. Bezborodov, V.G. Shram // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 55, No. 11-12. – P. 967-971. – DOI 10.1007/s10556-020-00722-x. – EDN GVAQFP.
4. Кокорин В.В., Кондратов А.В. Анализ статистических данных, причин и негативных воздействий разлива нефти и нефтепродуктов // Аллея науки. – 2023. – Т. 1. – № 6 (81). – С. 44-47.
5. Ismayilova, H. Diagnosis of the risk of oil leaks from pipelines / H. Ismayilova, F. Ismayilova, M. Shahlarly // Reliability: Theory & Applications. – 2023. – Vol. 18, No. S5(75). – P. 449-455. – DOI 10.24412/1932-2321-2023-575-449-455. – EDN PHLOFW.
6. Галлямов М.А., Шарипкулов Т.С., Макулова Д.Р. Особенности определения понятий «авария» и «инцидент» на опасном производственном объекте на примере магистрального трубопровода // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 3. – С. 824-843.
7. Investigation of the microstructure of the oil pipeline pipes destroyed as a result of corrosion / F. E. Suleimenova, N. El-Sayed, R. Kh. Sharipov, E. N. Suleimenov // Integrated use of mineral raw materials. – 2022. – No. 4(323). – P. 60-67. – DOI 10.31643/2022/6445.41. – EDN XSGCMY.
8. Рыжикова У.А., Залозная Н.Г. Пожары газовых фонтанов как чрезвычайная ситуация // Химические аспекты техносферной безопасности: от инноваций до внедрения. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 190-летию со дня рождения Д.И. Менделеева. Химки, 2024. – С. 220-229.
9. Chao Chen, Changjun Li, Genserik Reniers, Fuqiang Yang. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS // Journal of Cleaner Production 279(2021) 123583. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123583>.
10. Галиева Р.Т., Байкова Л.Р. Особенности трубопроводного транспорта сжиженного природного газа в вечномёрзлых грунтах // Трубопроводный транспорт – 2016: материалы XI Международной учебно-научно-практической конференции. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 401-404.
11. Елифановский Д.М., Твердынин Н.М. Защита трубопроводного транспорта от коррозии // Устойчивость материалов к внешним воздействиям. Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции. Химки, 2022. – С. 93-97.
12. Savin, I.A. Connection of the steel pipes having a polymeric covering on internal and external surfaces / I.A. Savin, M. Akhmedeev // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 299. – P. 766-771. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.766. – EDN IWDZIN.
13. Сальников А.В., Салаватов Т.Ш., Ягубов З.Х., Мустафаева Г.Р. Экспериментальная оценка адгезионных свойств внутреннего гладкостного покрытия трубопроводов к асфальто-смоло-парафинистым отложениям нефтей Ярегского месторождения // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2020. – № 1. – С. 51-58.
14. Шадрин П.Н., Ленченкова Л.Е., Волошин А.И. Подбор ингибиторов с регулируемыми свойствами предотвращения выпадения парафина при транспортировке нефтей различной вязкости // Нефтяная провинция. – 2016. – № 1 (5). – С. 83-97.
15. Mamedov, K.A. Prevention of corrosion destruction of oil-field equipment by composition based on technical phosphatides / K.A. Mamedov, N.S. Gamidova // SOCAR Proceedings. – 2021. – No. 4. – P. 95-101. – DOI 10.5510/ogp20210400619. – EDN CYKXYH.
16. Lukács, J. Integrity increasing of damaged transporting pipelines using fiber reinforced polymer composite wrap systems / J. Lukács, Z. Konesik, P. Chován // Engineering Failure Analysis. – 2022. – Vol. 137. – P. 106284. – DOI 10.1016/j.engfaila-
- nal.2022.106284. – EDN OXZYOG.
17. About the effectiveness of hydrocarbon diluents for pipeline transportation of high viscosity heavy and waxy oil / P.A. Revel-Muroz, R.N. Bakhtizin, R.M. Karimov, B.N. Mastobaev // SOCAR Proceedings. – 2021. – No. SII. – P. 148-155. – DOI 10.5510/ogp2021si100521. – EDN BKEFBN.
18. Марютина Т.А., Мусина Н.С., Романова Ю.Н., Авзалетдинов А.Г., Ахмадиев Р.Н., Трубкин С.А. Способ снижения вязкости высоковязкого нефтяного сырья для трубопроводного транспорта. Патент на изобретение RU 2701431 C1, 26.09.2019. Заявка № 2018137177 от 23.10.2018.
19. Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я. Расчетные исследования разложения газогидрата в скважине при воздействии высокочастотной электромагнитной волны. М.: Нефтяное дело, 2007. – 186 с.
20. Fuzzy Assessment of Technological Risks in the Main Oil Pipeline / H.G. Ismayilova, Z.I. Farzalizada, J.R. Damirova [et al.] // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1323. – P. 127-131. – DOI 10.1007/978-3-030-68004-6_16. – EDN LYMBZX.
21. Морозов Н.Н., Мазаник А.И. Обоснование способа защиты трубопроводов в арктической зоне от закупорок // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 1 (60). – С. 60-65.
22. Moissev V.I. Construction of the simulation model of transportation oil products / V.I. Moissev, V.A. Ksenofontova, T.S. Karpova // CEUR Workshop Proceedings: Proceedings of Models and Methods of Information Systems Research Workshop 2019, St. Petersburg, 04–05 december 2019. Vol. 2556. – St. Petersburg: 2020. – P. 103-107. – EDN OEZZSY.
23. Купцов С.М. Теплофизические свойства пластовых жидкостей и горных пород нефтяных месторождений. М.: Издательство Недр, 2008. – 204 с.

Статья поступила в редакцию 01.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 613.6

EDN: REJEIY

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 1279-3916

AuthorID: 730124

ORCID: 0000-0001-6399-8902

ScopusID: 57170233100

ЗАКИРОВА Альфия Резавановна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Техносферная безопасность»

Уральский государственный университет путей сообщения

(620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, e-mail: AZakirova@usurt.ru)

Аннотация. Статья посвящена защите электротехнического персонала при воздействии электрических и магнитных полей. Необходимость разработки системы защиты электротехнического персонала обусловлена высокой производственно обусловленной заболеваемостью. Цель работы: создание системы защиты электротехнического персонала при воздействии электрических и магнитных полей с техническим решением, позволяющим контролировать дозу энергетической нагрузки электромагнитного поля. Задачи: разработать концепцию системы защиты персонала при воздействии электрических и магнитных полей с методическим, лечебно-профилактическим и техническим обеспечением. В качестве технического решения предлагается новое устройство контроля дозы энергетической нагрузки электромагнитного поля (ЭМП), называемое «часы КДП», которое представляет собой комплексное решение для повышения здоровья и безопасности электротехнического персонала. Основными функциями устройства являются: непрерывный мониторинг уровней ЭМП с учетом индивидуальных характеристик работников, автоматизированный анализ данных с использованием искусственного интеллекта, а также предоставление персонализированных рекомендаций по их защите от вредного воздействия. Устройство обеспечивает информирование о возможности допуска работников к выполнению обязанностей в условиях воздействия энергетической нагрузки ЭМП, а также автоматически ведет документацию, что способствует прозрачности учета здоровья сотрудников. Преимущества внедрения «часов КДП» заключаются в повышении уровня электромагнитной безопасности на производстве, снижении вероятности повреждения здоровья персонала при воздействии электрических и магнитных полей и экономической эффективности, связанной с уменьшением затрат на лечение и компенсации. Внедрение данного устройства в систему защиты электротехнического персонала согласуется с основными принципами безопасности труда и позволит улучшить условия труда, способствуя формированию культуры безопасности. Это, в конечном итоге, приведет к повышению общей эффективности работы предприятия. Статья полезна для работодателей, у которых на балансе имеется электроподвижной состав.

Ключевые слова: система защиты, электрические поля, магнитные поля, безопасность, электротехнический персонал, электроподвижной состав.

PROTECTION SYSTEM FOR ELECTRICAL PERSONNEL UNDER EXPOSURE TO ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

© The Author(s) 2025

ZAKIROVA Alfiya Rezavanovna, candidate of technical sciences,

associate professor of the Department of Technosphere Safety

Ural State University of Railway Engineering

(66 Kolmogorova str., Yekaterinburg, 620034, Russia, e-mail: AZakirova@usurt.ru)

Abstract. The article is devoted to the protection of electrical personnel under the influence of electric and magnetic fields. The need to develop a protection system for electrical personnel is due to the high occupational morbidity. The purpose of the work: to create a system for protecting electrical personnel when exposed to electric and magnetic fields with a technical solution that allows controlling the dose of the energy load of the electromagnetic field. Objectives: to develop a concept of a personnel protection system under the influence of electric and magnetic fields with methodological, therapeutic, preventive and technical support. As a technical solution, a new device for monitoring the dose of the energy load of the electromagnetic field (EMF), called the "KDP clock", is proposed, which is a comprehensive solution for improving the health and safety of electrical personnel. The main functions of the device are: continuous monitoring of EMF levels, taking into account the individual characteristics of employees, automated data analysis using artificial intelligence, as well as providing personalized recommendations for their protection from harmful effects. The device provides information about the possibility of allowing employees to perform duties under the influence of EMF energy stress, and also automatically maintains documentation, which contributes to the transparency of employee health records. The advantages of the introduction of "KDP watches" are to increase the level of electromagnetic safety in production, reduce the likelihood of damage to personnel's health when exposed to electric and magnetic fields, and

economic efficiency associated with reduced treatment and compensation costs. The introduction of this device into the electrical personnel protection system is consistent with the basic principles of occupational safety and will improve working conditions, contributing to the formation of a safety culture. This will eventually lead to an increase in the overall efficiency of the enterprise. The article is useful for employers who have electric rolling stock on their balance sheet.

Keywords: protection system, electric fields, magnetic fields, safety, electrical personnel, electric rolling stock.

Для цитирования: Закирова А.Р. Система защиты электротехнического персонала при воздействии электрических и магнитных полей / А.Р. Закирова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 186-190. – EDN: REJEIY.

Введение. Для соблюдения требований Конституции РФ [1] на рабочих местах электротехнического персонала необходимо оценивать и контролировать электрические и магнитные поля, а при их аддитивном воздействии – и дозу энергетической нагрузки ЭМП; иначе возникает вероятность повреждения здоровья персонала. Проведенный анализ нормативной документации в области ЭМП до 1 кГц показал, что ЭМП до 1 кГц (кроме 50 Гц) в производственных условиях не нормируются, не оцениваются и не контролируются. Соответственно, возникает вероятность повреждения здоровья электротехнического персонала, обслуживающего электроподвижной состав, которая может быть связана с производственно обусловленной и профессиональной заболеваемостью. К профессиональным заболеваниям при воздействии на персонал электрических и магнитных полей [2], относят выраженные расстройства вегетативной (автономной) нервной системы. А производственно обусловленную заболеваемость персонала можно оценить по статистическим данным, приведённым ниже. Технические устройства контроля ЭМП в электроподвижном составе отсутствуют. В настоящее время эта проблема актуальна и требует решения. Необходим комплекс организационно-технических мероприятий, объединённый в систему защиты персонала.

Методология. В статье использованы методы анализа и систематизации в области электромагнитной безопасности персонала. Высокая вероятность повреждения здоровья электротехнического персонала от электромагнитных полей показана в:

- исследованиях всех профессий работников ОАО «РЖД» [3-4] за период с 2011 по 2015 г. Отмечено, что наибольший вклад в заболеваемость внесли работники локомотивных бригад – до 43%. В последние годы у работников локомотивных бригад активно обсуждаются вопросы сердечно-сосудистых заболеваний. Определено, что 86% случаев внезапной смерти приходится на лиц в возрасте от 40 до 59 лет;

- анализе, проведенном среди работников ОАО «РЖД» с 2009 по 2021 г. [5-6]. Из них 38% – это работники локомотивных бригад, 33,8% – работники группы пути, 28,2% – работники остальных категорий профессий железнодорожного транспорта.

Проанализированы места смертей работников локомотивных бригад (профессиональная группа I); результаты следующие: в рабочее время и на рабочем

месте (не во время движения локомотива) – 61%, в рабочее время и во время движения локомотива – 16%, вне дома – 15%, и дома – 8%. Медиана возраста исследуемых составила 49 лет (43-53), самому молодому умершему работнику было 23 года, а самому возрастному – 64. Наличие смертей работников локомотивных бригад (машинистов и их помощников) на рабочих местах свидетельствует о высоком уровне профессионально обусловленного и профессионального риска, вызванного воздействием вредных производственных факторов, в том числе и электромагнитных полей.

Компания ОАО «РЖД» решает проблему повреждения здоровья и смертности персонала от болезней системы кровообращения, периодически разрабатывая целевые комплексные программы [7]. Но как показывает анализ заболеваемости, этого недостаточно; требуются дополнительные меры защиты персонала. Для предупреждения повреждения здоровья персонала необходимо разработать и внедрить систему защиты персонала.

Цель работы: создание системы защиты электротехнического персонала при воздействии электрических и магнитных полей с техническим решением, позволяющим контролировать дозу энергетической нагрузки электромагнитного поля.

Результаты. Нами предлагается новая концепция системы защиты персонала при воздействии электрических и магнитных полей (рис. 1). Она содержит методическое, лечебно-профилактическое и техническое обеспечение.

Методическое обеспечение включает разработанный проект ГОСТ Р «Определение вероятности повреждения здоровья электротехнического персонала при аддитивном воздействии электрических и магнитных полей», основанный на логико-вероятностном моделировании [8], и методические указания (рекомендации) «Аддитивное дозовое воздействие энергии ЭМП разного рода и частоты переменного тока до 1 кГц на персонал в производственных условиях» [9].

Лечебно-профилактическое обеспечение нацелено на сохранение здоровья людей (персонала) и включает направление работников на медицинские осмотры и осуществление мониторинга состояния здоровья персонала.

Техническое обеспечение охватывает экранирование электроустановок и устройства контроля и сигнализации электрических и магнитных полей [10-

13], в том числе и дозы энергетической нагрузки ЭМП.

Изначально в качестве технического решения было разработано устройство [13], которое позволяет постоянно измерять уровни энергетической нагрузки ЭМП в течение всей поездки. Целью разработки данного устройства была реализация способа «защита временем», но этого недостаточно. Для оценки дозы энергетической нагрузки ЭМП предложено полностью автоматизировать весь процесс оценки и контроля дозы энергетической нагрузки ЭМП. Для этого данное устройство можно дополнить

приёмником сигналов, предназначенным для приёма и первичной обработки информации, передаваемой от устройства измерения энергетической нагрузки ЭМП и передачи её в устройство «часы КДП» (Контроль Дозы Поля) с системой искусственного интеллекта, содержащего личный кабинет работника и обладающей способностью анализировать информацию об уровнях дозы энергетической нагрузки ЭМП и предоставлять индивидуальные рекомендации для предупреждения производственно обусловленной заболеваемости.



Рисунок 1 – Система защиты электротехнического персонала при воздействии электрических и магнитных полей

Предложенное устройство контроля дозы энергетической нагрузки электромагнитными полями (ЭМП) представляет собой комплексное решение для обеспечения здоровья и безопасности электротехнического персонала. Устройство «часы КДП» объединяет современные технологии измерения, анализа данных и информационного взаимодействия, что способствует снижению вероятности повреждения здоровья электротехнического персонала.

Основные функции устройства «часы КДП»:

1. Непрерывный мониторинг энергетической нагрузки ЭМП: устройство обеспечивает постоянное измерение энергетической нагрузки ЭМП и проводит расчет дозы с учетом индивидуальных характеристик работников, таких как площадь тела и масса, время воздействия, вероятности воздействия дозы на электротехнический персонал в течение суток. Это позволяет более точно оценивать дозу воздействия ЭМП на персонал.

2. Анализ данных ЭМП: устройство использует искусственный интеллект, что дает возможность автоматизировано проводить анализ собранных данных. Это дает возможность не только фиксировать дозу энергетической нагрузки ЭМП, но и определять условную вероятность производственно обуслов-

ленной заболеваемости работников на основе предельно безопасных уровней и их превышения [8-9].

3. Индивидуальные рекомендации: на основании полученных данных «часы КДП» могут предоставлять рекомендации для каждого работника, включая мероприятия по защите от вредного воздействия ЭМП. На основе полученных уровней вероятности повреждения здоровья работников искусственный интеллект принимает решение о необходимости использования или неиспользования системы защиты, в том числе и направления работников на лечебные и оздоровительные процедуры.

4. Информирование электротехнического персонала о допуске к работе: устройство автоматически определяет, когда работник может быть допущен к выполнению обязанностей в условиях действия энергетической нагрузки ЭМП, что значительно повышает уровень электромагнитной безопасности.

5. Документация и учет: информация о дозах энергетической нагрузки ЭМП и состоянии здоровья персонала автоматически отправляется в личные кабинеты работников и в отдел кадров, что обеспечивает прозрачность и учет здоровья сотрудников.

Преимущества внедрения устройства в систему

защиты электротехнического персонала:

- повышение уровня электромагнитной безопасности. Производство становится более безопасным для работников, так как осуществляется контроль за уровнем энергетической нагрузки ЭМП;

- снижение вероятности повреждения здоровья персонала. Благодаря осуществлению «защиты временем» и своевременному информированию работников о необходимости профилактических мер, снижается вероятность развития производственно обусловленных заболеваний;

- экономическая эффективность. Снижение вероятности повреждения здоровья электротехнического персонала приводит к уменьшению затрат на лечение и компенсации, а также повышает общую производительность труда.

Таким образом, входящее в систему защиты электротехнического персонала, при воздействии электрических и магнитных полей, устройство «часы КДП» не только улучшает условия труда, но и содействует формированию культуры электромагнитной безопасности на рабочем месте. Внедрение данной системы защиты персонала может стать важным шагом в обеспечении здоровья работников и повышении общей эффективности работы предприятия.

Обсуждение. Существующая система методического обеспечения в области оценки, контроля и нормирования электрических и магнитных полей до 1 кГц имеет пробелы. Поэтому требовалась разработка проекта ГОСТ Р «Определение вероятности повреждения здоровья электротехнического персонала при аддитивном воздействии электрических и магнитных полей» и методических указаний (рекомендаций) «Аддитивное дозовое воздействие энергии ЭМП разного рода и частоты переменного тока до 1 кГц на персонал в производственных условиях».

Действующее лечебно-профилактическое обеспечение не рассматривает в полной мере (по электрическим и магнитным полям) производственно обусловленные заболевания работников, а приведенные статистические исследования указывают на высокий уровень именно таких заболеваний.

В настоящее время устройства сигнализации и контроля электрических и магнитных полей в ЭПС отсутствуют. Решением может стать устройство «часы КДП».

Перед прохождением предрейсового медицинского осмотра электротехническому персоналу выдают индивидуальные «часы КДП». В личном кабинете работника медицинский персонал проверяет допуск к работе и вносит информацию о росте и массе тела работника. Начав поездку, электротехнический персонал включает вышеуказанное устройство, в котором искусственный интеллект рассчитывает и сохраняет информацию о полученной дозе энергетической нагрузки ЭМП. Также определяется условная вероятность

производственно обусловленной заболеваемости работника. Эта информация дублируется на дисплее «часов КДП». В конце смены работник на часах выбирает функцию «передать информацию», и она поступает в личный кабинет работника и специалиста в отдел кадров. Выбрав на дисплее «личный кабинет», можно ознакомиться с результатами расчетов и необходимых мероприятий.

При наступлении вероятности повреждения состояния здоровья электротехнического персонала в личный кабинет специалиста в отделе кадров поступит информация о необходимости направления работника на санаторно-курортное лечение. Помощники машинистов подвергаются более высоким уровням электрических и магнитных полей, поэтому чаще будут направляться на санаторно-курортное лечение. Это происходит из-за периодического нахождения их в машинных отделениях электроподвижного состава. Применение устройства «КДП» соответствует основным принципам безопасности труда и позволит не только сохранить здоровье помощникам машинистов, но и увеличить производительность труда в будущем уже машинистам, что особенно актуально при работе в одно лицо.

Выводы. Статья сосредоточена на разработке системы защиты электротехнического персонала от воздействия электрических и магнитных полей, что стало необходимостью из-за высокой производственно обусловленной заболеваемости в данной области. Предложена эффективная система защиты электротехнического персонала, позволяющая контролировать дозу энергетической нагрузки электромагнитного поля (ЭМП) с помощью нового устройства, названного «часы КДП». Это устройство призвано обеспечить непрерывный мониторинг уровней ЭМП с учетом индивидуальных характеристик работников, а также проводить автоматический анализ данных с использованием искусственного интеллекта и предоставлять персонализированные рекомендации по охране труда. Внедрение данного устройства способствует улучшению электромагнитной безопасности, снижает вероятность повреждения здоровья электротехнического персонала. Данный подход соответствует основным принципам трудовой безопасности и представляет собой определенный шаг к формированию культуры электромагнитной безопасности, что в итоге повысит общую эффективность работы предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Конституция Российской Федерации URL:https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28399/ (дата обращения: 04.02.23).
2. Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 27 апреля 2012 г. № 417н – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_129943/ (дата обращения: 08.02.23).
3. Капцов В.А., Мезенцов, А.П., Панкова, В.Б. Производственно-профессиональный риск железнодорожников.

–М.: ООО фирма «Реинфор», 2002. – 350 с.

4. Николаевский, Е.Н. Профессиональные заболевания у машинистов локомотивных бригад в современных условиях / Е.Н. Николаевский, Г.С. Кажигалиева // Новая наука: проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 79. – № 5-3. – С. 25-27.

5. Жидкова Е.А., Найговзина Н.Б., Калинин М.Р. Результаты анализа причин внезапной смерти среди работников локомотивных бригад // Кардиология. – 2019. – Т. 59, № 6. – С. 42-47.

6. Жидкова Е.А. Анализ причин внезапной смерти среди работников железных дорог Российской Федерации // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 497-506.

7. Целевая комплексная программа по снижению заболеваемости и предотвращению смертности от болезней системы кровообращения, раннему выявлению онкологических заболеваний у работников ОАО "РЖД" на период 2019-2023гг». – URL: <https://sr2023.rzd.ru/ru/social-aspect/social-personnel-policy/social-support> (дата обращения: 04.08.23).

8. Сидоров А.И., Закирова А.Р. Метод логико-вероятностного моделирования энергетических характеристик ЭМП, воздействующих на персонал // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 12 (276). – С. 21-26.

9. Закирова, А.Р. Защита электротехнического персонала тягового электроснабжения от вредного воздействия электромагнитных полей: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.01 / Закирова Альфия Резавановна. – Екатеринбург, 2013. – 160 с.

10. Патент № 2436111 Российская Федерация. Способ контроля уровня напряженности магнитного поля электроустановок переменного тока и устройство для его осуществления / А.Р. Закирова, К.Б. Кузнецов; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34.

11. Патент № 2457500 Российская Федерация. Способ контроля уровня напряженности магнитного поля по приведенным уровням высших гармонических составляющих переменного тока и устройство для его осуществления / А.Р. Закирова, К.Б. Кузнецов; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

12. Патент № 2572294 Российская Федерация. Устройство для контроля напряженности магнитных полей переменного и постоянного токов / А.Р. Закирова, Ж.М. Буканов; опубл. 10.01.2016, Бюл. № 1.

13. Патент № 2441248 Российская Федерация. Устройство для измерения плотности потока энергии электромагнитного поля / А.Р. Закирова, К.Б. Кузнецов; опубл. 27.01.2012, Бюл. № 3.

14. Kosarev A.B., Kosarev B.I. Electromagnetic effect of an alternating current traction power supply system with a high-voltage power cord on electrical installations and networks of contraction consumers / Kosarev A.B., Kosarev B.I. // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – № 2. – С. 128-134.

15. Suslov K., Kryukov A., Ilyushin P., Kryukov A., Shepvalova O. Modeling of modes of traction power supply systems equipped with renewable energy sources // Energy Reports. – 2023. – Т. 9. – № S9. – С. 447-461.

16. Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K. Effect of unbalanced and non-linear loads on operation of the turbogenerator of a distributed generation unit // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 3643.

17. Kosarev A.B. Electromagnetic effect of an alternating current traction power supply system with a high-voltage power cord on electrical installations and networks of contraction consumers / A.B. Kosarev, B.I. Kosarev // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – № 2. – С. 128-134.

18. Zakirova A.R. On Technogenic Impact of Electromagnetic Components of Rectified Current and Voltage on Environment / K. Kuznetsov, A. Zakirova // Lecture Notes in Electrical Engineering 641 LNEE. 2020. P. 444-451.

19. Zakirova A.R. Electromagnetic safety in transport engineering / Zakirova A.R., Lugaskova N.V., Kuznetsov K.B. // AIP Conference Proceedings. – 2023. – No. 2476. – Paper 020047.

20. Suslov K., Kryukov A., Voronina E., Fesak I. Modeling power flows and electromagnetic fields induced by compact induced by compact overhead lines feeding traction substations of mainline railroads // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Т. 13. – № 7. – С. 4249.

21. Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K. Simulation of power router-based DC distribution systems with distributed generation

and energy storage units // Energies. – 2023. – Т. 16. – № 1. – С. 214.

22. Suslov K., Kryukov A., Ilyushin P., Cherepanov A., Kryukov A. Modeling the effects of electromagnetic interference from multi-wire traction networks on pipelines // Energies. – 2023. – Т. 16. – № 10. – С. 4188.

23. Kryukov A., Suslov K., Ilyushin P., Akhmetshin A. Parameter identification of asynchronous load nodes // Energies. 2023. Т. 16. № 4. С. 1893.

24. Kosarev A.B., Kosarev B.I. System of traction AC power supply with catenary supports not connected with a railway track // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Т. 90. – № 6. – С. 421-427.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 519.25+ 311.16+ 504.06

EDN: ULMOAM

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА: ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 6365-0860

AuthorID: 438628

ORCID: 0000-0002-9860-9230

ResearcherID: A-0000-0000

ScopusID: 57074849400

СМИРНОВА Елена Эдуардовна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Промышленная экология»*Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет
(197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 14, литер А, e-mail: esmirnovae@yandex.ru)*

Аннотация. Настоящее исследование посвящено статистическому анализу влияния химического состава многокомпонентных цементов на их эксплуатационные характеристики и экологические показатели. Целью работы является разработка подходов к оптимизации состава цементов для повышения их сульфатостойкости, контроля самонапряжения и линейного расширения, а также снижения углеродного следа. Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к устойчивому строительству и необходимостью разработки экологически безопасных строительных материалов. В качестве методов исследования использовались корреляционный анализ данных о химическом составе компонентов цементных смесей (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 и др.) и их эксплуатационных характеристик (самонапряжение, линейное расширение, сульфатостойкость). Визуализация корреляционных матриц осуществлялась с помощью тепловых карт (библиотека Seaborn в Python). Дополнительно проведены расчеты экономической и экологической эффективности замены части клинкера активированными добавками, такими как доменные шлаки и фосфогипс. Экспериментальные данные о химическом составе компонентов были получены из патента, а также использованы образцы цементов, изготовленные на основе различных активных добавок. Результаты исследования подтвердили значительное влияние содержания SiO_2 , Al_2O_3 и других компонентов на эксплуатационные характеристики цементов. Установлено, что замена клинкера на 30% активными добавками снижает углеродный след на 25-40%. Оптимизация содержания SiO_2 в составе цемента повышает сульфатостойкость конструкций в агрессивных средах, а термоактивация шлаков увеличивает прочностные характеристики на 12-15%. Экономический анализ показал, что замена клинкера позволяет снизить стоимость производства цементов на 10-15%. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых рецептур экологически безопасных и экономически эффективных многокомпонентных цементов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: корреляционный анализ, многокомпонентные цементы, статистический анализ, сульфатостойкость, углеродный след, экологическая безопасность.

STATISTICAL PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA: STUDY OF THE INFLUENCE OF MULTICOMPONENT CEMENTS COMPOSITION ON ENVIRONMENTAL INDICATORS

© The Author(s) 2025

SMIRNOVA Elena Eduardovna, candidate of technical sciences,
associate professor "Industrial Ecology" Department*St. Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University
(197376, Russia, St. Petersburg, Professor Popov St., 14, letter A, e-mail: esmirnovae@yandex.ru)*

Abstract. This study investigates the statistical influence of the chemical composition of multi-component cements on their performance characteristics and environmental impact. The aim is to develop approaches for optimizing cement composition to enhance sulfate resistance, control self-stress and linear expansion, and reduce the carbon footprint. The research is motivated by the increasing demands for sustainable construction and the need for environmentally friendly building materials. The research methodology employed includes correlation analysis of data on the chemical composition of cement components (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , etc.) and their performance characteristics (self-stress, linear expansion, and sulfate resistance). Correlation matrices were visualized using heatmaps (Seaborn library in Python). Furthermore, calculations of the economic and environmental benefits of partially replacing clinker with supplementary cementitious materials (SCMs), such as ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) and phosphogypsum, were performed. Experimental data on the chemical composition of components were obtained from a patent, and cement samples produced with various SCMs were also used. The results confirmed the significant influence of SiO_2 , Al_2O_3 , and other components on cement performance. Replacing 30% of the clinker with SCMs was found to reduce the carbon footprint by 25-40%. Optimizing the SiO_2 content in the cement enhances the sulfate resistance of concrete structures in aggressive environments, while thermal activation of slag increases compressive strength by 12-15%. Economic analysis demonstrated that clinker replacement can reduce cement production costs by 10-15%. These findings can be used

to develop new formulations for environmentally sound and cost-effective multi-component cements with enhanced performance properties.

Keywords: correlation analysis, multi-component cements, statistical analysis, sulfate resistance, carbon footprint, environmental sustainability.

Для цитирования: Смирнова Е.Э. Статистическая обработка данных эксперимента: исследование влияния состава многокомпонентных цементов на экологические показатели / Е.Э. Смирнова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 191-199. – EDN: ULMOAM.

Введение. Многокомпонентные цементы играют ключевую роль в современном строительстве благодаря их экологическим и эксплуатационным преимуществам. Они позволяют сократить углеродный след и улучшить долговечность конструкций, что делает их исследование крайне актуальным в условиях роста требований к устойчивому строительству. Обзор публикаций последних лет показывает значительное внимание к химическому составу многокомпонентных цементов и их свойствам. В работах А.М. Rashad (2023) рассматривается влияние стальных волокон и оксида кальция на свойства цементов, включая прочность и устойчивость к агрессивным средам [1-2]. Исследования М.М. Rahman и М.Т. Bassuoni (2014, 2020) подчеркивают значимость предотвращения сульфатной коррозии путем оптимизации состава цемента [3-4]. Также выделяется важность снижения содержания С3А для повышения устойчивости бетонов к агрессивным средам (Сивков, 2015) [5]. М. Thomas et al. (2008) акцентируют внимание на задержанном формировании этtringита как факторе, влияющем на долговечность [6]. И.П. Павлова (2016) отмечает, что пластифицирующие добавки значительно влияют на прочностные характеристики и деформации расширяющихся цементных систем. Выбор пластификатора с соответствующей химической структурой значительно улучшает характеристики цементных систем, способствуя их адаптации к специфическим требованиям строительства [7]. Исследования подтверждают важность изучения состава цементов для достижения оптимальных характеристик [8-11].

Л.Д. Шахова и Д.Е. Кучеров (2008) рассматривают практику применения многокомпонентных цементов в Германии. С переходом цементной промышленности на стандартизированный выпуск, возникает необходимость выбора цемента с учетом его вещественного и минералогического состава. Композиционные и многокомпонентные цементы, включающие активные добавки и инертные наполнители, имеют ограниченное применение в России. Однако их использование позволяет снизить долю клинкера и способствует снижению эмиссии CO_2 , а также повышает прочность и долговечность бетона. В статье также рассматриваются нормативные требования и потенциал новых цементов в различных областях строительства [12].

М.Н. Чомаевой (2019) обсуждается влияние цементной промышленности на экологию и подчеркивается необходимость разработки новых ви-

дов цементов с улучшенными экологическими показателями. Проблемы с образованием токсичных газов, таких как диоксины и цианиды, требуют строгого контроля за составом сырья и температурой процесса, чтобы предотвратить их образование и защитить здоровье населения. Введение комплексных технологий дехроматизации и утилизации отходов в цементной промышленности значительно снижает уровень тяжелых металлов и других вредных примесей, что является важным шагом к экологически чистому производству [13]. Диссертация О.Н. Хохрякова (2022) посвящена внедрению высокодисперсных вяжущих и использованию промышленных отходов в производстве цементов для создания новых строительных материалов, отвечающих требованиям современного строительства. Для улучшения свойств цементов автор предлагает использовать поликарбоксилатные суперпластификаторы, которые повышают текучесть и уменьшают водопотребность, что позволяет достичь более высокой прочности и долговечности бетонных конструкций [14]. Учеными подчеркивается, карбонатные цементы низкой водопотребности представляют собой перспективную и экологически чистую альтернативу традиционным цементам в России, способствуя снижению углеродных выбросов и улучшению устойчивости строительных материалов. Благодаря своей способности снижать водопотребность и улучшать пластичность бетонных смесей, карбонатные цементы обеспечивают не только экономическую, но и экологическую эффективность, что соответствует требованиям устойчивого развития [15]. В современных исследованиях механики композитов особое внимание уделяется повышению начальной прочности цементных материалов через механическую активацию. Наиболее заметные результаты достигаются при активации бинарной смеси цемента и песка, что позволяет значительно увеличить прочностные характеристики на ранних стадиях твердения [16]. Применение тонкодисперсных добавок и суперпластификаторов позволяет достичь значительных результатов в повышении прочности и долговечности порошкovo-активированных бетонов [17].

Несмотря на значительные успехи в области изучения многокомпонентных цементов, остается нерешенной проблема повышения их экологической устойчивости при сохранении эксплуатационных характеристик. Одной из ключевых задач является разработка адаптированной матрицы компонентов,

которая позволила бы оптимизировать состав цементов для различных условий эксплуатации [18].

Актуальность исследования подтверждается современными требованиями к снижению углеродного следа в строительной индустрии и потребностью в экологически безопасных строительных материалах [19-21]. К тому же международные стандарты требуют новых подходов к оценке и оптимизации свойств цементов.

Результаты исследования имеют практическую значимость для производителей строительных материалов, так как позволяют разработать новые рецептуры цементов, способствующие повышению их устойчивости и долговечности. Это также вносит вклад в решение глобальных экологических проблем, связанных с сокращением выбросов CO_2 .

Целью данной работы является изучение влияния многокомпонентных цементов на их экологические показатели и эксплуатационные характеристики, а также разработка подходов к оптимизации их состава.

Методология. Формирование целей статьи основано на анализе актуальных проблем в области многокомпонентных цементов, включая необходимость снижения углеродного следа, повышения

долговечности и устойчивости к агрессивным средам. Анализ литературы позволил определить текущее состояние исследований, выявить ключевые проблемы и сформировать цели исследования.

В исследовании использован комплексный подход для определения взаимосвязи между химическим составом компонентов цемента (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 и др.) и его эксплуатационными характеристиками (самонапряжение, линейное расширение, сульфатостойкость). Анализ проводился с помощью библиотеки *Pandas* и визуализировался с помощью тепловых карт *Seaborn* в *Python*.

Для анализа данных применялось программное обеспечение на базе *Python*, позволившее эффективно обрабатывать и визуализировать результаты. Пробные образцы цемента получены из разнообразных источников, включая портландцемент, доменные шлаки и фосфогипс, что обеспечило широкий спектр характеристик для анализа [22].

Результаты. Автором рассматривались данные из патента о составе многокомпонентных цементов для проведения корреляционного анализа с целью оценить экологическую эффективность цементов и их прогнозные характеристики (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав компонентов для цементных смесей (мас. %)

Компонент	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3 FeO	MgO	Na_2O / Na_2O_3	K_2O	SO_3/S	TiO_2	P_2O_5	MnO	H_2O	mm	Прочие
1. Портландцемент клинкер (Пикалево)	22,15	64,21	4,54	3,36	1,25	0,66	0,6	0,23	0,32	-	-	-	2,08	-
2. Доменный шлак (Череповец, А)	38,9	39,6	8,9	0,54	10,54	-	-	0,59	-	-	0,29	-	-	-
3. Доменный шлак (Магнитогорск, Б)	37,48	40,87	11,0	0,25	7,67	-	-	0,93	0,51	-	0,21	-	-	-
4. Электротермосульфат шлак (СПТИ)	41,25	46,83	2,63	2,61	2,47	-	-	0,35	-	0,25	-	-	-	1,16
5. Гидрогранат кальция (ГТК-1, Пикалево)	0,1 - 1,58	37,72- 38,31	24,60- 24,91	0,16 - 0,16	0,70 - 0,72	5,75 - 5,84	-	-	-	-	-	-	24,96- 29,49	-
6. Гидрогранат кальция (ГТК-2, СПТИ)	0,12 - 2,1	45,46- 46,39	29,12- 29,72	0,19 - 0,19	0,85 - 0,88	6,78 - 6,92	-	-	-	-	-	-	15,52- 15,81	-
7. Кварцевый песок (Вольск)	98,55	0,58	0,64	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1
8. Фосфогипс (Кингисепп)	0,5	32,5	0,6	0,2	-	-	-	44,3	-	1,6	-	19,4	-	-

Корреляционный анализ. Цель: выявить зависимости между химическим составом компонентов цементов и их свойствами, включая самонапряжение, линейное расширение и сульфатостойкость.

Используем код:

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt

# Данные
data = {
    "SiO2_clinker": [22.15] * 8,
    "SiO2_slag_domen_A": [38.9, 0, 38.9, 38.9, 38.9, 38.9, 38.9, 38.9],
    "SiO2_slag_domen_B": [0, 37.48, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
```

```
"SiO2_slag_ETS": [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 41.25],
"SiO2_ggk1": [(0.1 + 1.58) / 2] * 8,
"SiO2_ggk2": [(0.12 + 2.1) / 2] * 8,
"SiO2_sand": [98.55] * 8,
"SiO2_phosphogypsum": [0, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
"Al2O3_clinker": [4.54] * 8,
"Al2O3_slag_domen_A": [8.9] * 8,
"Al2O3_slag_domen_B": [0, 11.0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
"Al2O3_slag_ETS": [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2.63],
"Fe2O3_clinker": [3.36] * 8,
"Fe2O3_slag_domen_A": [0.54] * 8,
"Fe2O3_slag_domen_B": [0, 0.25, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
"Fe2O3_slag_ETS": [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2.61],
"Sulfate_gypsum": [2.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
"Sulfate_phosphogypsum": [0, 2.0, 4.0, 3.0, 3.0, 3.0, 0, 5.0],
"Silicate_slag_domen_A": [40, 0, 40, 35, 40, 40, 40, 0],
```

```
"GGK_1": [0.00, 3.75, 6.00, 3.00, 7.50, 0.00, 10.0, 5.00],  
"GGK_2": [0.00, 3.75, 3.00, 2.00, 0.00, 7.50, 5.00, 10.0],  
"Clinker": [57.5, 69.5, 47.0, 57.0, 49.5, 49.5, 40.0, 40.0],  
"Expansion": [0.95, 1.40, 1.94, 1.89, 1.99, 1.90, 1.95, 1.50],  
"Tensile_Strength": [0.00, 2.50, 4.61, 4.00, 3.79, 0.26,  
3.60, 0.70],  
"Sulfate_Resistance": [1.01, 1.70, 1.62, 1.77, 0.96, 1.50,  
1.60, 1.78],  
}  
# Создание DataFrame  
df = pd.DataFrame(data)
```

```
# Корреляционная матрица  
correlation_matrix = df.corr()  
# Построение тепловой карты  
plt.figure(figsize=(16, 12))  
sns.heatmap(correlation_matrix, annot=True, fmt=".2f",  
cmap="coolwarm")  
plt.title("Тепловая карта корреляции компонентов и  
свойств цемента")  
plt.show()
```

Получаем корреляционную матрицу (рис. 1).

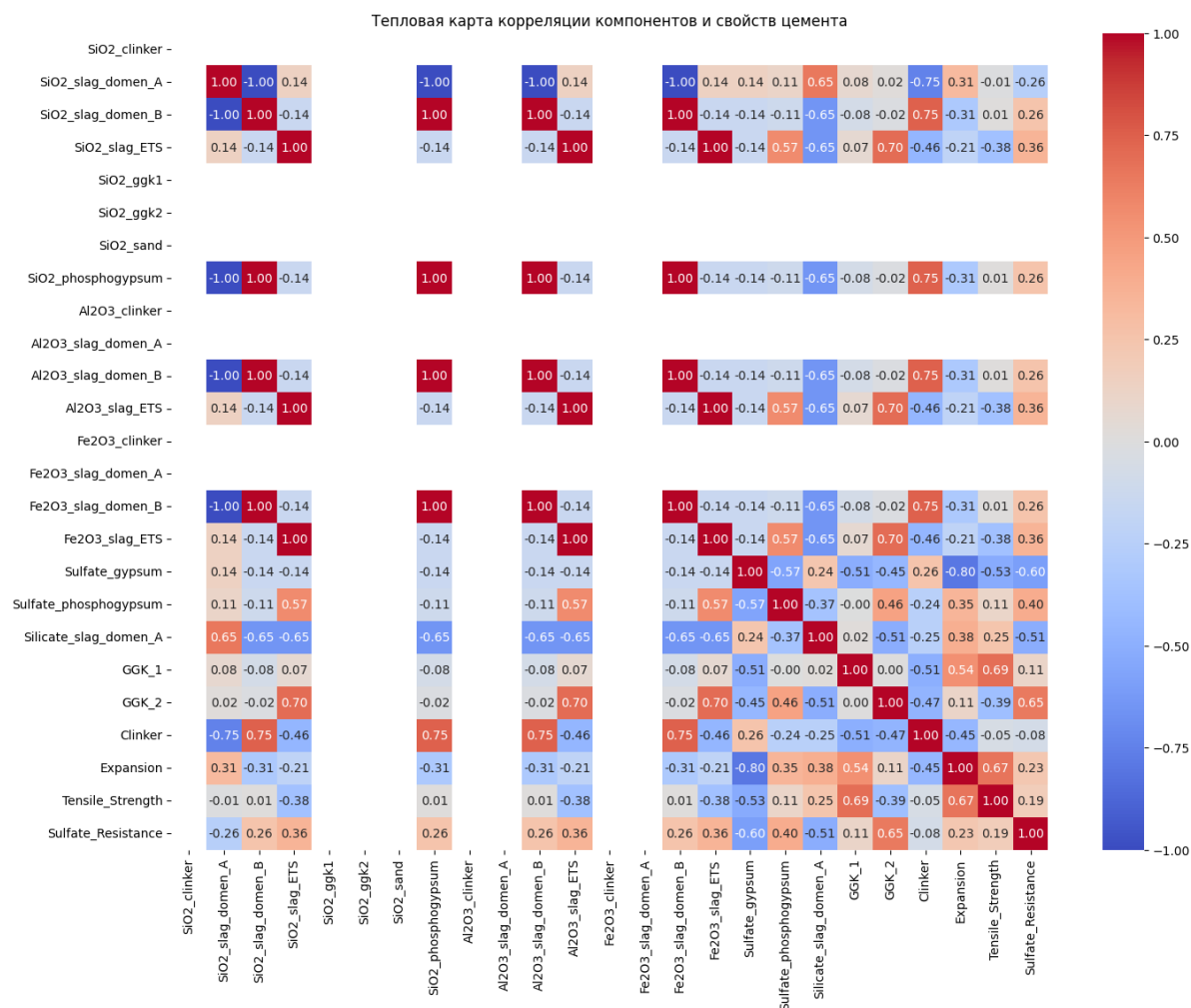


Рисунок 1 – Корреляционная матрица химического состава и свойств цемента (составлено автором)

Тепловая карта корреляции дает визуальное представление о силе и направлении линейных взаимосвязей между различными компонентами цемента (оксиды кремния, алюминия, железа, кальция, сульфаты, гидрогранаты) и его свойствами (прочность на растяжение, расширение, сульфатостойкость). Анализ карты позволяет выявить значимые факторы, влияющие на качество и поведение цемента. Значения, близкие к +1,00 и -1,00 показывают сильную корреляцию. На карте видно отрицательную корреляцию между SiO_2 slag_domen_A и SiO_2 slag_domen_B, что ожидаемо, так как оба компонента – доменный шлак с высоким содержанием SiO_2 ; если количество одного

возрастает, то другого уменьшается, чтобы сохранить общую массу и химический баланс. При производстве шлака важно поддерживать оптимальное соотношение оксидов для достижения желаемых свойств. Стехиометрия шлака должна учитывать определенное соотношение SiO_2 к CaO для достижения хорошей прочности и устойчивости к сульфатам. При использовании различных видов руды или плавильных температур, содержание SiO_2 имеет разные вариации. Менее сильные положительные корреляции наблюдаются между разными оксидами в пределах одного типа шлака.

Clinker и оксиды Si , Al , Fe в доменных шлаках и фосфогипсе ($r = 0,75$). Положительная корреляция

указывает на их взаимодействие в структуре цемента. В процессе обжига сырья для клинкера (обычно при температуре около 1400-1500°C) происходит образование различных минералов, таких как трехкальциевый силикат C_3S , дисиликат кальция C_2S , трехкальциевый алюминат C_3A и четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF . Эти минералы имеют разные механические и химические свойства, и их образование зависит от содержания SiO_2 , Al_2O_3 и FeO . Эти оксиды способствуют образованию более прочных структурных единиц в клинкере, что отражается в положительной корреляции [23].

Компоненты *GGK* (гидравлические добавки) и *Expansion*, *Tensile Strength*, *Sulfate Resistance* ($r = 0,54 - 0,69$). Умеренная корреляция указывает на их статистическую связь. Изменения содержания клинкера напрямую изменяют свойства *GGK*-компонентов. Это важно для контроля гидратации и улучшения ранней прочности цемента. Содержание клинкера влияет на объемное изменение гидравлических добавок. Например, определенные минералы в клинкере вызывают гидратацию, которая приводит к увеличению объема, что связано с образованием новых фаз или с изменениями в структуре материала. Высокое содержание клинкера улучшает механические свойства, такие как прочность на растяжение, благодаря образованию прочных минералов, таких как C_3S и C_2S , обеспечивающих хорошую сцепляемость и прочность в гидратированном состоянии. Сульфатостойкость зависит от соотношения оксидов в клинкере и наличия определенных фаз, таких как C_4A_3S . Увеличение содержания клинкера, богатого алюминатами, повышает устойчивость к сульфатам, что важно для долгосрочной эксплуатации бетона в агрессивных условиях. Тем не менее в цементах, содержащих активные минеральные добавки, высокую сульфатостойкость обеспечивает пониженное содержание C_3A в клинкере. Так, в стандартах Великобритании, Германии и Китая допускают содержание C_3A в высоко-сульфатостойком цементе, равное 3,5, 3,0 и 5,0 соответственно. Оптимизация SiO_2 содержания поможет отрегулировать механические свойства и предотвратить микротрещины. Чрезмерное увеличение доли SiO_2 в клинкере приводит к ухудшению сульфатостойкости цемента [5].

Значительная часть положительных корреляций наблюдается между компонентами, связанными с одним и тем же типом шлака. Положительная корреляция между оксидом кальция в доменном шлаке и сульфатостойкостью указывает на устойчивость к сульфатам. Включение CaO (3-5%) как активатора в матрицу снижает водопоглощение, общую пористость, увеличивает смачивание / высыхание, а также устойчивость к кислотному воздействию. CaO оказывает значительное влияние на прочность при сжатии в раннем возрасте по сравнению с более поздним возрастом. Корреляция между сульфатами и сульфатостойкостью ожидаемо слабо поло-

жительная [1].

Самонапряжение (*Tensile Strength*) и *Expansion* ($r = 0,67$) предполагает, что использование доменного шлака способствует контролируемому расширению цемента.

Сульфатный фосфогипс (*Sulfate phosphogypsum*) и *Sulfate Resistance* ($r = 0,40$). Фосфогипс положительно влияет на сульфатостойкость, подтверждая значение как альтернативного и экологически безопасного материала, способного эффективно подавлять линейные деформации цементных растворов.

Силикатная доменная добавка (*Silicate slag dommen A*) и *Sulfate Resistance* ($r = -0,51$). Отрицательная корреляция противоречит ожидаемому эффекту. Хотя приведенный состав шлака выглядит типичным, некоторые компоненты или примеси существенно снижают устойчивость к сульфатной коррозии. Например, повышенное содержание свободного оксида магния (MgO) или щелочей (Na_2O , K_2O) снижают устойчивость к сульфатам. Сульфатная среда способна вызвать образование таумасита в начальные сроки в период силикатсодержащей фазы или вторичного этtringита, «взрывающего» бетон изнутри [3].

Клинкер и сульфатостойкость (*Sulfate Resistance*) ($r = -0,08$). Увеличение доли клинкера приводит к снижению способности противостоять сульфатным атакам. Причина этого – низкая химическая стойкость клинкера к сульфатной среде, что делает необходимым его замену альтернативными добавками. Клинкер, особенно если он содержит высокие уровни трикальций алюмината (C_3A), менее устойчив к сульфатным атакам. В связи с этим для улучшения сульфатостойкости целесообразно использовать шлаковые добавки.

Clinker и *Expansion* ($r = -0,45$) указывает на то, что клинкер снижает способность цемента к контролируемому расширению, ухудшая механическую стабильность. Высокое содержание клинкера приводит к неуправляемым объемным изменениям в бетоне. Клинкерные минералы способны влиять на гидратацию и формирование гидратированных фаз. В результате, внутреннее напряжение вызывает растрескивание [6].

Fe_2O_3 доменного шлака *A* и *Expansion* ($r = -0,31$). Увеличение содержания Fe_2O_3 снижает линейное расширение за счет образования более стабильных фаз, менее подверженных изменениям объема, что является полезным для предотвращения растрескивания в агрессивных условиях.

Таким образом, анализ корреляции показывает, что минимизация клинкера, замена традиционных добавок альтернативными материалами (шлаки, фосфогипс и др.) и контроль содержания SiO_2 , Al_2O_3 и сульфатных компонентов являются ключевыми стратегиями для повышения экологической безопасности цемента. Это не только снижает углеродный след производства, но и улучшает долговечность и устойчивость строительных материалов, что

соответствует принципам устойчивого строительства.

Переход к адаптированной матрице. Для разработки цемента с прогнозируемыми и улучшенными характеристиками требуется переход к адаптированной матрице. Необходима точная оценка ключевых факторов, влияющих на свойства цемента и потребностях оптимизации состава для достижения целевых характеристик. Крайне актуальным является требование к сульфатостойкости цемента, которая должна быть не менее 9 единиц для применения в агрессивных средах. Этот показатель, как видно из анализа, имеет сильную корреляцию с содержанием SiO_2 , Al_2O_3 и сульфатных компонентов, что подчеркивает их приоритетное значение при упрощении матрицы.

Еще одно важное обстоятельство: оптимизация линейного расширения (*Expansion*). Данные показывают, что увеличение содержания SiO_2 доменного шлака и песка способствует контролируемому расширению, что критически важно для предотвращения растрескивания в конструкциях. Компоненты, прямо влияющие на этот показатель, следует выделить как ключевые. Переход к упрощенной матрице позволит сконцентрироваться на наиболее важных факторах и разработать более точную и практичную модель для прогнозирования свойств

цемента.

Ниже представлен обновленный код:

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt

# Данные (адаптированные к патенту)
data = {
    "CaO": [38.31, 45.46, 40.87, 39.6],
    "SiO2": [22.15, 37.48, 38.9, 41.25],
    "Al2O3": [4.54, 11.0, 8.9, 2.63],
    "Sulfate_Component": [2.5, 4.0, 3.5, 5.0],
    "Sulphate_Resistance": [8.5, 9.1, 8.9, 9.5],
    "Self_Tension": [7.2, 7.5, 7.3, 7.8],
    "Linear_Expansion": [0.15, 0.75, 1.25, 1.85]
}
df = pd.DataFrame(data)

# Корреляционная матрица
corr_matrix = df.corr()

# Визуализация
sns.heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap="coolwarm")
plt.title("Корреляционная матрица химического состава и свойств цемента")
plt.show()
```

Получаем корреляционную матрицу (рис. 2).

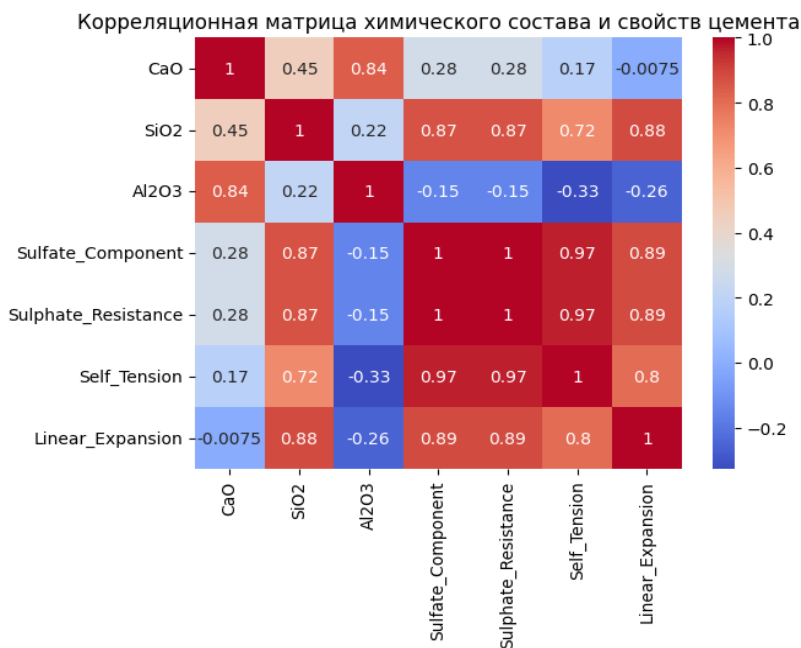


Рисунок 2 – Обновленная корреляционная матрица химического состава и свойств цемента (составлено автором)

Анализ матрицы и выводы:

- установлено, что сульфатостойкость цемента имеет слабо положительную корреляцию с содержанием CaO ($r = 0,28$). Для ее повышения нужно сосредоточиться на других компонентах (например, SiO_2 или $Self_Tension$, самонапряжение), которые демонстрируют более сильное влияние;

- сильная положительная корреляция между содержанием SiO_2 и сульфатостойкостью (0,87)

указывает на необходимость оптимизации доли SiO_2 для повышения экологической устойчивости;

- уровень самонапряжения сильно коррелирует с устойчивостью к сульфатам (0,97), что подтверждает его значимость для данного свойства. Самонапряжение помогает материалу справляться с химическими нагрузками, вызванными сульфатами;

- корреляция (1,0) означает, что *Sulfate_Component* (например, $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$) и

сульфатостойкость изменяются вместе;

- высокая положительная корреляция между (0,89) сульфатостойкостью и линейным расширением (*Linear Expansion*) в расширяющихся многокомпонентных цементах объясняется комплексным взаимодействием компонентов, включая добавки, шлаки и гидрогранаты, которые могут одновременно влиять на оба свойства, а также контролируемым расширением на ранних стадиях гидратации, потенциально увеличивающим сульфатостойкость в определенных пределах [7].

- увеличение содержания оксида кремния приводит к увеличению линейного расширения, и наоборот (0,88). Это указывает на то, что SiO_2 – главный компонент для управления расширением цемента. Обычно в портландцементе массовая доля SiO_2 составляет около 21-22% [24]. Для повышения сульфатостойкости цемента рекомендуется снижать содержание трехкальциевого алюмината (C_3A) до уровня не более 8% [25].

Прогноз: корректировка доли SiO_2 на 10%. обеспечит повышение сульфатостойкости на 8,7%, включая оптимизацию состава (введение более активного сульфатного компонента фосфогипса или фторогипса).

Обсуждение. Результаты корреляционного анализа показали сложные взаимосвязи между составом многокомпонентных цемента и их свойствами. Подтверждена важность снижения доли клинкера для повышения сульфатостойкости и контроля линейного расширения. Исследования А.С. Брыкова (2014) [23] и А.М. Rashad (2023) [1] показывают, что сокращение доли клинкера на 30% и замена его активированными добавками (например, шлаками и фосфогипсом) приводит к снижению выбросов CO_2 на 25-40%. Однако следует контролировать оптимальное использование шлака в бетонных смесях. Оно составляет около 40 % от общего содержания вяжущего [26]. Согласно J. He et al. (2023), производство цемента AAS (щелочно-активированного шлакового) может сократить выбросы CO_2 до 78,1% по сравнению с обычным портландцементом, способствуя снижению воздействия на окружающую среду [27]. В рамках настоящего исследования это подтверждается расчетами. Уравнение экологической эффективности:

$$E = (C_{base} - C_{mod}) / C_{base} * 100\%, \quad (1)$$

где

C_{base} – содержание клинкера в базовом составе (65%),

C_{mod} – содержание клинкера в модифицированном составе (35%).

При замене доли клинкера на 30%, снижение выбросов CO_2 составит:

$$E = (65 - 35) / 65 * 100\% = 46,2\%.$$

Данный показатель согласуется с данными из литературы и подчеркивает вклад исследования в экологически чистые технологии.

Замена клинкера добавками снижает стоимость цемента за счет внедрения отходов производства,

что соответствует выводам экономической эффективности. Экономический вклад может быть рассчитан по формуле:

$$S = (C_{clinker} * P_{clinker} - C_{additive} * P_{additive}), \quad (2)$$

где

CC – объем компонента,

PP – стоимость за единицу.

Например, в патенте RU2342337C1 указано, что при добавлении 10% минеральной добавки от массы клинкера себестоимость цемента снижается примерно на 8-10%, а при добавлении 20% – на 13-15% [28].

Выявлена сильная корреляция между содержанием SiO_2 и сульфатостойкостью ($r=0.87$), что открывает возможности для оптимизации состава цемента путем регулирования доли кремнезема. Показатель совпадает с данными С.В. Бастрыгиной и Р.В. Конохова (2022). Согласно их модели, увеличение доли SiO_2 в количестве 0,5-2,0 мас. % повышает прочность бетона на 15-40% [29]. В статье Н.Э. Джаббаровской и У.Ф. Гасановой также утверждается, что добавка в цемент микрокремнезема в количестве 10% повышает прочность на сжатие и на изгиб (50% и 16% соответственно), в количестве 20% приводит к максимальному росту прочности (72% и 18%) [30]. В нашем исследовании расчеты показывают, что для достижения требуемой сульфатостойкости (не менее 9 единиц) при исходном значении 8,5 потребуется:

$$\Delta C_{SiO_2} = (T - S_{base}) / K, \quad (3)$$

где

$T = 9T = 9$ (целевая сульфатостойкость),

$S_{base} = 8,5$ (исходная стойкость),

$K=0,5$ (усредненный прирост стойкости на 1% SiO_2).

Найдем значение сульфатостойкости:

$$\Delta C_{SiO_2} = (9 - 8,5) / 0,5 = 1\%.$$

Данный расчет в целом согласуется с данными литературы и подчеркивает роль SiO_2 в разработке цемента для агрессивных сред.

Аналогично, в работе М.М. Rahman et al. (2014) подчеркивается важность оптимизации содержания SiO_2 для повышения долговечности цемента [3]. Наше исследование также подтвердило сильную положительную корреляцию ($r=0,87$) между SiO_2 и сульфатостойкостью.

Результаты корреляционного анализа показали значительные взаимосвязи между компонентным составом многокомпонентных цемента и их свойствами. В частности, в исследовании М. Thomas et al. (2021) отмечено, что использование термоактивации шлаков приводит к улучшению прочностных характеристик [6]. Это совпадает с полученными данными, где термоактивированные шлаки показали повышение прочности на 12-15% по сравнению с неактивированными [1]. Термоактивация увеличивает реакционную способность компонентов. Согласно литературным данным, термоактивация повышает степень гидратации шлаков, что приводит к формированию более прочной матрицы цемента [26]. Сделаем расчет на основе состава и корреляцион-

ного анализа. Для оценки влияния термоактивации на прочность используем формулу прироста прочности:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{актив}} - \sigma_{\text{неактив}}, \quad (4)$$

где:

$\sigma_{\text{актив}}$ – прочность цемента с термоактивированными шлаками,

$\sigma_{\text{неактив}}$ – прочность цемента с неактивированными шлаками.

По результатам корреляционного анализа формула (3) принимает вид:

$$\sigma_{\text{актив}} = 1,15 * \text{По (увеличение на 15\%)}. \quad (5)$$

Таким образом, если базовая прочность цемента (с/неактив) составляет, например, 30 МПа, то изменение будет следующим:

$$\Delta\sigma = 1,15 * 30 - 30 = 4,5 \text{ МПа}.$$

Это соответствует литературным данным и подтверждает корреляционную зависимость, представленную в исследовании. Оптимальная активация добавок, например, доменного шлака, приводит к росту прочности на 12-15%, что согласуется с указанным коэффициентом.

Исследование А.М. Rashad (2023) показывает, что добавление CaO в матрицу цементов увеличивает прочность в ранние сроки твердения, однако снижает устойчивость к сульфатным атакам [1]. Наши данные подтверждают это, где корреляция между CaO и сульфатостойкостью составляет всего $r=0,28$. В то же время использование добавок, богатых алюминатами, приводит к улучшению стойкости в агрессивных средах.

Неожиданным результатом стало отрицательное влияние силикатной доменной добавки на сульфатостойкость. Это требует дальнейшего исследования и может быть связано с наличием примесей в шлаке или спецификой его взаимодействия с другими компонентами цемента. Отрицательная корреляция между силикатной доменной добавкой и сульфатостойкостью ($r=-0,51$) требует дальнейшего изучения. В работе M.R. Sakr и M.T. Bassuoni (2021) обсуждаются примеси (MgO , K_2O) в шлаках, которые могут снижать устойчивость цементов [4]. Это согласуется с предположением о возможном влиянии состава шлаков в нашем исследовании. Также требует дополнительных исследований влияние содержания C_3A на сульфатостойкость, учитывая противоречивые данные из литературы и стандартов разных стран.

Корреляция между самонапряжением и сульфатостойкостью ($r=0,97$) подчеркивает важность внутреннего сопротивления материала агрессивным средам. Результат дополняет известные данные, представленные в статье И.П. Павловой и К.Ю. Беломесовой (2021), где самонапряжение связано с повышением прочности и долговечности [31].

Взаимосвязь линейного расширения с содержанием SiO_2 ($r=0,88$) подтверждает, что кремнезем играет ключевую роль в управлении объемными изменениями цемента. Однако состав многокомпонентных цементов показал различное поведение при использовании гидротранатов, что

связано с их различной кристаллической структурой. Это открывает новые перспективы для исследования взаимодействий между компонентами и возможностей оптимизации состава для достижения требуемых характеристик.

Таким образом, результаты исследования заполняют пробелы в знаниях о влиянии состава многокомпонентных цементов на их свойства и предоставляют математически обоснованные рекомендации для повышения экологической и экономической эффективности.

Выводы. Статистическая обработка данных эксперимента подтвердила существенное влияние состава многокомпонентных цементов на их эксплуатационные характеристики, включая сульфатостойкость, линейное расширение и самонапряжение. Корреляционный анализ, проведенный в рамках исследования, выявил сильную взаимосвязь между содержанием SiO_2 и сульфатостойкостью, а также между самонапряжением и устойчивостью к сульфатам, что важно для разработки экологически эффективных составов. Увеличение доли SiO_2 на 1% обеспечивает прирост сульфатостойкости на 0,5 единицы, что согласуется с расчетами и данными литературных источников и подтверждает ключевую роль SiO_2 в управлении свойствами цементов.

Статистическая оценка показала, что снижение доли клинкера и замена его альтернативными материалами, такими как шлаки и фосфогипс, способствует улучшению экологических показателей многокомпонентных цементов за счет уменьшения выбросов CO_2 и снижения стоимости. Расчеты, основанные на экспериментальных данных, подтвердили снижение выбросов CO_2 на 46,2% при замене части клинкера, что соответствует целям устойчивого развития. Экономический эффект замены клинкера добавками выражается в снижении стоимости производства цементов на 10-15% за счет использования отходов. Данный результат согласуется с данными из литературы и подчеркивает экологическую значимость использования отходов производства.

Проведенный анализ подтвердил значительное влияние химического состава многокомпонентных цементов на их эксплуатационные характеристики. Установлено, что снижение содержания клинкера на 30% и его замена активированными добавками, такими как доменные шлаки и фосфогипс, позволяет сократить углеродный след на 25-40%.

Применение термоактивации шлаков показало повышение прочностных характеристик цементов на 12-15%. Это связано с улучшением реакционной способности активированных компонентов, что способствует формированию более плотной и прочной цементной матрицы. Анализ демонстрирует необходимость дальнейших исследований для уточнения оптимальных температур и условий термоактивации.

Влияние гидротранатов на свойства цементов

выявило их сложное поведение, обусловленное кристаллической структурой. Установлено, что изменение содержания гидрогранатов влияет на линейное расширение и самонапряжение, что открывает перспективы для создания материалов с заданными характеристиками. Данное направление требует дополнительных исследований для углубленного изучения механизмов взаимодействия компонентов.

Полученные в ходе статистической обработки результаты, в частности, отрицательная корреляция между силикатной доменной добавкой и сульфатостойкостью, указывают на необходимость дальнейших исследований. Требуется более детальный статистический анализ влияния примесей в шлаке, содержания C_3A и других факторов на сульфатостойкость и свойства многокомпонентных цементов для разработки оптимальных экологических составов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Rashad A.M. A concise on the effect of calcium oxide on the properties of alkali-activated materials: a manual for civil engineers // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2023. – Vol. 17. – P. 72.
2. Rashad A.M. Effect of steel fibers on geopolymers properties – the best synopsis for civil engineer // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 246. – P. 118534.
3. Rahman M.M., Bassuoni M.T. Thaumasite sulfate attack on concrete: mechanisms, influential factors and mitigation // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 73. – Pp. 652-662.
4. Sakr M.R., Bassuoni M.T. Effect of nano-based coatings on concrete under aggravated exposures // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 32 (10). – P. 04020284.
5. Сивков С.П. Новый стандарт на сульфатостойкие цементы: рекомендации для производителей и потребителей // Цемент и его применение. – 2015. – №1. – С. 56-58.
6. Thomas M., Folliard K.J., Drimalas T., Ramlochan T. Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures // Cement and Concrete Research. – 2008. – No. 38 (6). – P. 841-847.
7. Павлова И.П. Влияние пластифицирующих добавок на свойства расширяющихся цементных систем // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 16. – С. 35-40.
8. Markiv T., Sobol K., Petrovska N., Hunyak O. The effect of porous pozzolanic polydisperse mineral components on properties of concrete // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 47. – P. 275-282.
9. Srikakulam L.M., Khed V.C. Theoretical Research and Performance of Engineered Cementitious Composite // Springer Proceedings in Materials. – 2020. – Vol. 8. – Pp. 253-264.
10. Yum W.S., Suh J.-I., Jeon D., Oh J.E. Strength enhancement of CaO-sulfated slag system through addition of calcium formate as a new auxiliary activator // Cement and Concrete Composites. – 2020. – Vol. 109. – P. 103572.
11. Sanytsky M., Marushchak U., Olevych Y., Novytskyi Y. Nano-modified ultra-rapid hardening Portland cement compositions for high strength concretes // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 47. – Pp. 392-399.
12. Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е. Особенности поведения многокомпонентных цементов в бетонах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2008. – № 3. – С. 27-29.
13. Чомаева М.Н. Экология производства цемента // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – № 2-1. – С. 8-10.
14. Хохряков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности и строительные материалы на их основе: диссертация ... д.т.н.: 2.1.5. / Хохряков О.В. Казань: КГАСУ, 2022. – 460 с.
15. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р., Гиззатуллин А.Р., Харченко И.Я. Карбонатные цементы низкой водопотребности – зеленая альтернатива цементной индустрии России // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 76-82.
16. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Лейцин В.Н. Оценка эффективности механической активации исходных компонентов композиционного материала на основе цемента // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – 2024. – № 4 (61). – С. 3-17.
17. Дыкин И.В., Величко Е.Г., Ерёмин А.В. Порошково-активированные бетоны – многоуровнево-модифицированные цементные системы // Международный научный исследовательский журнал. – 2017. – №3 (57). – С. 37-40.
18. Шнабель М., Бур А., Даттон Д. Реология огнеупорных бетонов с высокими эксплуатационными характеристиками на основе глинозема и шпинели // Новые огнеупоры. – 2017. – № 3. – С. 119-126.
19. Юдович Б.Э., Дмитриев А.М., Лямин Ю.А., Зубехин С.А. Цементная промышленность и экология // Цемент и его применение. – 1998. – № 3. – С. 11-19.
20. Yang S., Bieliatynskiy A., Trachevskiy V., Shao M., Ta M. Research of nano-modified plain cement concrete mixtures and cement-based concrete // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2023. – Vol. 17. – P. 50.
21. Sydor N., Marushchak U., Braichenko S., Rusyn B. Development of component composition of engineered cementitious composites // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 100. – P. 459-465.
22. Андреев В.В., Смирнова Е.Э. Цемент, содержащий портландцементный клинкер, гидрогранат кальция и сульфатный компонент [Текст]: пат. RU 2079458 C1. Рос. Федерация; – заявл. 06.07.94; опубл. 20.05.1997; Бюл. – № 19 (2).
23. Брыков А.С. Сульфатная коррозия портландцементных бетонов // Цемент и его применение. – 2014. – № 6. – С. 96-103.
24. Сульфатостойкий портландцемент ЦЕМ I 42,5Н СС навал ГОСТ 22266-2013. URL: https://dvcentr.ru/catalog/naval/sulfatostoykiy-portlandcement-cem-i-425n-ss-naval-gost-22266-2013-57300042/?utm_source=chatgpt.com (дата доступа: 12.01.2025).
25. Пуццолановый цемент, производство и применение пуццоланового цемента. URL: https://www.voscem.ru/articles/cement-vidy/puccocem/info/?utm_source=chatgpt.com (дата доступа: 12.01.2025).
26. Lee H.S., Wang X.Y., Zhang L.N., Koh K.T. Analysis of the optimum usage of slag for the compressive strength of concrete // Materials (Basel). – 2015. – Vol. 8 (3). – P. 1213-1229.
27. He J., Yu S., Sang G., He J., Wang J., Chen Z. Properties of alkali-activated slag cement activated by weakly Alkaline activator // Materials (Basel). – 2023. – Vol. 16 (10). – P. 3871.
28. Бикбай М.Я., Бикбай Я.М., Чень Л. Способ обжига высокоактивного смешанного материала с подачей вне головки обжигательной печи и устройство для осуществления указанного способа [Текст]: пат. RU 2342337 C1. Рос. Федерация; – заявл. 01.06.2007; опубл. 27.12.20; Бюл. № 36.
29. Бастрыгина С.В., Конохов Р.В. Влияние кремнеземсодержащих добавок на прочностные свойства легкого бетона на пористом заполнителе // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. – 2022. – № 1 (2). – С. 58-66.
30. Джаббаров Н.Э., Гасанова У.Ф. Влияние добавки микрокремнезема на прочность бетона // Проблемы науки. – 2022. – № 1 (69). – С. 12-15.
31. Павлова И.П., Беломосова К.Ю. Влияние вида дисперсного армирования на прочностные характеристики расширяющихся цементных вяжущих с высокой энергией расширения // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей III международной научной конференции, Новополюцк, 29-30 апр. 2021 г. / Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. Новополюцк: Полоц. гос. ун-т, 2021. – С. 111-118.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 331.453

EDN: POKLMJ

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА

© Автор(ы) 2025

SPIN: 4768-3762

AuthorID: 632808

ORCID: 0000-0001-7858-143X

ResearcherID: Q-2218-2017

ScopusID: 57219990976

СЕМЕЙКИН Александр Юрьевич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова
(308012, Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46, e-mail: semeykin.ay@bstu.ru)

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, 4, стр. 1, e-mail: klimovaev@rgsu.net)

SPIN: 2250-3493

AuthorID: 414990

ORCID: 0000-0002-4447-2312

ScopusID: 57205659400

НОСАТОВА Елена Анатольевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова
(308012, Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46, e-mail: nosatova.ea@bstu.ru)

SPIN: 2361-2396

AuthorID: 1069311 ORCID: 0000-0002-0245-9478

ResearcherID: JXY-5982-2024

ScopusID: 58112178800

ПЕТРОВА Виктория Александровна, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности»

Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова
(308012, Россия, Белгород, ул. Костюкова, 46, e-mail: petrova.va@bstu.ru)

Аннотация. Основной целью риск-ориентированного подхода является снижение производственного травматизма и профессиональных заболеваний. Оценка профессионального риска (ПР) является инструментом указанной концепции, реализуемая при помощи различных количественных и качественных методов. Согласно официальным данным статистики несчастных случаев на предприятиях РФ внедрение обязательной процедуры оценки ПР с применением любого рекомендованного метода или разработанного самостоятельно не принесло ожидаемого результата. Уровень травматизма по абсолютным показателям остаётся достаточно высоким. Выбор оптимального метода оценки ПР и эффективность его применения влияют на конечный результат проводимой процедуры. Полученное значение профессионального риска определяет объём и перечень мероприятий, направленных на его снижение, в том числе финансовые затраты. Проведено сравнение результатов оценки ПР матричным способом, используемом на предприятии, с результатами оценки, полученными по методикам оценки индивидуального профессионального риска (ИПР) и Файна-Кинни. Для рассматриваемых методов установлено, что значение ПР зависит от применяемого метода оценки ПР. Это связано с тем, что каждая методика отличается базой исходных данных, и шкалой оценки рисков. Исключить субъективность при установлении ПР, учесть все случайные события, применить сложные математические вычисления, провести корреляцию между условиями труда, нарушением здоровья работника, его личностными качествами, а также сэкономить время на проведение оценки ПР позволит применение IT-технологий. Авторы предлагают внедрить адаптивную систему для управления безопасностью труда и профессиональными рисками.

Ключевые слова: профессиональный риск, условия труда, травматизм, безопасность труда, методы матричный, Файна-Кинни, ИПР.

ON THE ISSUE OF CHOOSING THE OPTIMAL ASSESSMENT METHOD OCCUPATIONAL RISK

© The Author(s) 2025

SEMEYKIN Alexander Yuryevich, 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 str., 46, e-mail: semeykin.ay@bstu.ru)

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 Peak Street, 4, p. 1, e-mail: klimovaev@rgsu.net)

NOSATOVA Elena Anatolyevna, 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 str., 46, e-mail: nosatova.ea@bstu.ru)

PETROVA Victoria Alexandrovna, assistant at the Department of Life Safety
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

(308012, Russia, Belgorod, Kostyukova str., 46, e-mail: petrova.va@bstu.ru)

Abstract. The main goal of the risk-oriented approach is to reduce occupational injuries and diseases. Occupational risk (OR) assessment is a tool of the above concept, which is realized with the help of various quantitative and qualitative methods. According to the official statistics of accidents at Russian enterprises, the introduction of a mandatory procedure for assessing occupational risk using any recommended method or one developed independently did not bring the expected result. The level of traumatism by absolute indicators remains quite high. The choice of the optimal method of occupational risk assessment and the efficiency of its application affects the final result of the procedure. The obtained value of occupational risk determines the scope and list of measures aimed at its reduction, including financial costs. The comparison of the results of the assessment of PR by the matrix method used at the enterprise with the assessment results obtained by the methods of individual occupational risk assessment (IOR) and Fine-Kinney was carried out. For the methods under consideration, it was found that the value of PR depends on the applied method of PR assessment. This is due to the fact that each methodology differs both the base of initial data and the scale of risk assessment. The use of IT-technologies will allow to exclude subjectivity in establishing the PR, to take into account all random events, to apply complex mathematical calculations, to conduct correlation between working conditions, violation of employee's health, his personal qualities, as well as to save time for the assessment of PR. The authors propose to introduce an adaptive system for labor safety and occupational risk management.

Keywords: occupational risk, working conditions, injuries, labor safety, matrix methods, Fine-Kinney, IPR.

Для цитирования: Семейкин А.Ю. К вопросу о выборе оптимального метода оценки профессионального риска / А.Ю. Семейкин, Е.В. Климова, Е.А. Носатова, В.А. Петрова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 200-209. – EDN: POKLMJ.

Введение. Определение понятию *профессиональный риск* (ПР) дано в ст. 209, п. 33 ТК РФ, как «вероятность причинения вреда жизни и (или) здоровью работника в результате воздействия на него вредного и (или) опасного производственного фактора при исполнении им своей трудовой функции с учетом возможной тяжести повреждения здоровья».

Установить вероятность реализации тяжести повреждения – травмы или профзаболевания позволяет оценка ПР (ОПР).

Впервые в российском законодательстве о снижении ПР было сказано в 1998 году в №125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний». Основной целью данного документа было повышение экономической заинтересованности страхователей.

Формирование культуры безопасности на производстве, стремление соответствовать глобальной концепции нулевого травматизма ускорили работу по обновлению системы управления охраной труда.

Одной из причин послужила необходимость создания базовых основ для оценки ПР [1, 2]. В ТК РФ были внесены корректирующие положения, в соответствии с которыми работодатель с 2001 года был обязан сообщать работнику о рисках повреждения здоровья, связанных с условиями труда, возможных компенсациях и необходимости обеспечения работника надёжными защитными средствами при выполнении обязанностей.

Принцип управления профессиональными рисками (УПР) нашёл отражение в Приказе Минтруда № 438н «Типовое положение о системе управления охраной труда». Принятый в августе 2016 года документ нёс социально-экономическую направленность профилактики травматизма. ОПР в нём носила рекомендательный характер. Прогрессивные руководители ряда крупных компаний, таких как ПАО «ГМК «Норильский Никель», Госкорпорация «Росатом», ПАО «Лукойл», ООО «Металлоинвест», ООО «РЖД» и др., при сотрудничестве с зарубежными партнёрами внедряли методы ОПР наряду

с другими управленческими технологиями. Это позволило им раньше сориентироваться в преимуществах нового подхода при управлении рисками на производстве.

Обязательную оценку ПР с марта 2022 года закрепила ст. 214 ТК РФ совместно с принятым ранее Приказом Минтруда РФ N 926 от 28.12.2021. В Приказе был предложен достаточный перечень методов оценки ПР и рекомендации их применения [3].

Однако к масштабным изменениям в законодательстве по ОТ оказались готовы не все организации и специалисты. Многим приходится оперативно осваивать и внедрять требования, актуальные на сегодняшний день. Многих стимулирует то, что отсутствие результатов проведения ОПР, является нарушением ТК РФ, а значит за него неизбежно последует административное наказание. Однако разнообразие методов ОПР, как отечественных, так и зарубежных, зачастую создаёт сложности при выборе метода ОПР. Необходимо отметить, что существующие правовые документы не ограничивают работодателей при выборе метода. Многие при отсутствии единого утверждённого метода ОПР применяют наиболее простой из предлагаемых, либо – свой вариант. Каждый может применить любой метод, известный как в мировой практике, так и разработанный самостоятельно.

Первые отечественные методики, базирующиеся на разных подходах и критериях при установлении риска, стали разрабатываться, как только понятие ПР появилось в законодательных документах. Существенным отличием большинства российских методик, как подметили авторы [4], является присутствие количественных критериев.

На «априорных гигиенических и апостериорных медико-биологических» критериях базируется методика оценки индивидуального профессионального риска (ИПР), предложенная НИИ медицины труда РАМН и Клиническим институтом охраны и условий труда (КИОиУТ) [5]. При оценке ИПР необходимы показатели, используемые в нормативно-правовых актах РФ и действующих документах предприятий. Позже, в 2015 году, она была адаптирована разработчиками для учёта данных, получаемых при СУОТ, реализуемых на российских предприятиях с 2014 года в связи с реализацией положений закона № 426-ФЗ.

Некоторые авторы в своих методиках делают акцент на преобладающий вредный фактор в профессиональной группе, например, тепловое облучение на работников [6], химический фактор [7], тяжесть труда [8] и др. Авторы метода «Кодекса лучшей практики» в качестве критериев опирались на уровни рисков травматизма, достигнутых в странах с высокими показателями безопасности труда [9]. Другие – совершенствовали и дополняли наиболее распространённые методы ОПР [10-12].

В настоящее время предложены несколько классификаций методов ОПР, учитывающих характеристики методов ОПР, получаемый результат их применения.

Как показал проведенный анализ, основная часть предлагаемых регламентированных и авторских методов основывается на критериях, закреплённых в нормативных документах, содержащих указания по выявлению рисков на производстве, определении опасностей и их источников. Основные группы критериев для выбора метода ОПР приведены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Критерии выбора метода ОПР

Для достоверной и объективной оценки дополнительно может учитываться мнение работников, включая неудовлетворённость существующими условиями труда, предложения по их оптимизации. Предписания специалистов ряда контролирующих организаций, сведения о видах нарушений в сфере охраны труда и промышленной безопасности, возможные варианты их устранения дополняют сведения.

Введение обязательной процедуры ОНР – это элемент масштабной реконструкции системы управления безопасностью и охраны труда (СУБиОТ). Основная цель всех нововведений – снижение риска травмирования и сохранение здоровья работников [13-17].

Однако проводимое реформирование пока не позволило достичь желаемого результата. Официальная статистика, приведенная в таблице 1, отражает существующий факт травмирования на производстве [18].

Таблица 1 – Статистика показателей производственного травматизма в РФ за период с 2017 по 2023 г.г.

Показатель	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве, тыс. человек:	25,4	23,6	23,3	20,5	21,6	20,3	20,87
- из них со смертельным исходом, тыс. человек	1,14	1,07	1,06	0,91	1,21	1,07	1,09

Показатели демонстрируют отсутствие стабильности снижения числа производственных несчастных случаев (НС) с 2017 года, следующим за годом принятия Приказа № 438н (заменён на Приказ Минтруда России от 29.10.2021 N 776н "Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда"), по 2023 год. В анализируемом периоде абсолютные значения показателей НС достаточно высоки.

Таким образом, совершенствование СУБиОТ, базирующееся на риск-ориентированном подходе,

находится на начальной стадии. Модернизация законодательства и СУБиОТ продолжается. Необходимость проведения исследования всех нюансов, возникающих при применении методологии ОНР и управлении ПР, остаётся актуальной.

Целью работы является поиск оптимального метода ОНР, а также ответа на вопрос: может ли выбор метода повлиять на оценку уровня ПР, а, значит, на состав мероприятий и средств, направленных на его минимизацию?

Методология. В данной работе использовались теоретические методы исследования, статистические и вероятностно-статистические, анализ научных публикаций, правовых документов, методик ОНР, карт специальной оценки условий труда (СОУТ) и ПР. Была поставлена задача сравнить метод, реализованный в действующей организации, с несколькими наиболее часто применяемыми при ОНР в РФ. Проведён сравнительный анализ методов, определены по каждому величине ПР работника для установления соответствия полученных результатов оценки.

Результаты. Исследование проводилось на одном из фармацевтических предприятий, расположенном в Белгороде. Одним из основных видов его деятельности является производство фармацевтических субстанций, получаемых методами химического синтеза или выделения из химического сырья, а также методом перекристаллизации из химического сырья (далее - Производство фармсубстанций). Выбор был сделан неслучайно. С одной стороны, Производство фармсубстанций не относится к видам экономической деятельности, характеризующимся высоким уровнем травматизма, как добывающая, обрабатывающая отрасли, сельское хозяйство и др., в то же время оно относится к ОПО в соответствии с №116-ФЗ [19].

С другой стороны, интерес был вызван ростом числа фармацевтических предприятий в РФ с 2021 года. Объяснением может послужить влияние политики импортозамещения. Динамика травматизма при Производстве фармсубстанций, в основном, соответствует таковой в РФ, за исключением показателей с летальным исходом. Численность пострадавших по данному показателю не превышает одного случая в год за анализируемый период (табл. 2).

Таблица 2 – Данные Росстата для Производства фармсубстанций за период 2017–2023 г.г.

Наименование показателя	Год						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Количество предприятий всего	280	294	314	179	426	439	461
Количество предприятий, где были НС	235	241	277	157	382	406	418
Отношение числа предприятий с происшедшими НС к их общему числу*	0,84	0,82	0,88	0,88	0,9	0,93	0,91
Численность общая, чел	74008	77034	77441	36445	91536	101889	98133
Численность пострадавших с утратой трудоспособности на 1 рабочий день и более и со смертельным исходом, чел.	72	83	73	33	68	69	73
Численность пострадавших со смертельным исходом, чел.	1	1	0	1	0	1	1
Число впервые зарегистрированных профзаболеваний	0	1	0	1	0	0	0

Примечание: * выполнено авторами

Как видно из данных таблицы 2 вслед за увеличением количества предприятий пострадавших на производстве с 2021 года тоже становится больше. Это можно связать не только с ростом числа рабочих мест, но и с необходимой адаптацией работников к новой социально-экономической среде в этот период.

Исследуемое в работе предприятие специализируется на производстве более двух десятков видов фармпродукции в виде субстанции-порошка. К ним относятся, например, акридонукусная кислота, янтарная кислота, рибоксин и др.

Одной из основных рабочих профессий, необходимых для реализации технологического процесса, является аппаратчик синтеза 6-го разряда (далее – Аппаратчик). Он был выбран для сравнительного анализа методов ОНР. В рассматриваемом цехе выполняют свои обязанности три работника, работающих посменно, в том числе и ночью.

В соответствии с Приложением к Приказу Минздравсоцразвития РФ от 28 марта 2006 г. N 208 «Единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих» (ЕТКС), раздела «Общие профессии химических производств», §244 Аппаратчик высокой квалификации должен знать особенности изготовления полупродуктов и продуктов органического синтеза, их свойства, схему и режимы процесса, приёмы безопасного обслуживания оборудования и всех устройств, измерительных приборов, требования технической документации [20].

Средняя численность работников в организации не превышает 300 человек. Специалистами предприятия для ОНР был выбран матричный метод.

Данный метод – наиболее популярный инструмент анализа риска в трудовой деятельности. Создание и применение матрицы является отличительным характерным свойством данного метода. Матрица содержит две оси. По одной из них располагаются факторы риска, а по другой – оценка вероятности их возникновения и последствий. Значения степени риска в ячейки матрицы позволяют выявить уровень риска и приоритизировать меры по его снижению [3].

Среди преимуществ матричного метода стоит выделить следующее:

- наглядность: он предоставляет ясное и структурированное представление о рисках;
- систематичность: позволяет учитывать множество факторов и их взаимосвязи при оценке рисков;
- понятность и доступность при принятии решений: помогает в идентификации наиболее критичных рисков, что упрощает процесс по их управлению;
- легкость в использовании: метод можно адаптировать в зависимости от специфики предприятия и доступных ресурсов;
- работа в команде: может использоваться для групповой работы, обмен мнениями повышает уро-

вень вовлеченности участников.

В то же время матричный метод характеризуется следующими недостатками:

- абсолютной субъективностью: оценка вероятностей и последствий часто зависит от мнения экспертов, что может привести к необъективным результатам [13];
- ограниченностью: матричный метод может не учитывать все аспекты профессиональных рисков, например, взаимодействие нескольких факторов;
- сложностью в интерпретации: для некоторых пользователей может быть сложно понять, как взаимодействуют различные риски;
- низкой динамичностью: метод может не обеспечивать достаточную гибкость для быстрого реагирования на изменения в условиях труда при появлении новых источников опасности.

В то же время, основное достоинство метода – простота в применении, позволили ему закрепиться во многих организациях страны. Но требует аккуратного применения и дополнительных методов для более комплексного анализа.

Предоставленные данные с предприятия результата ОНР Аппаратчика свидетельствуют о допустимом риске.

Для сравнительного анализа были выбраны метод Файна-Кинни и методика ИПР. Их достоинства, характеризующие востребованность при установлении риска, отражены в таблице 3.

Методика ИПР основана на анализе суммарной вредности условий труда на рабочем месте и состояния здоровья работника. В ней учитываются статистика травматизма и профзаболеваний, возраст, стаж работника.

Рабочее место Аппаратчика 6 разряда расположено в цехе по производству органических веществ, применяемых при изготовлении лекарственных препаратов. При синтезировании кислоты Аппаратчик контактирует с сырьевыми компонентами, среди которых присутствуют вещества с повышенными взрыво- и пожароопасными свойствами. Необходимо указать, что основная часть применяемых веществ по ГОСТ 12.1.007–76 «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» относятся ко 2, 3 и 4 классов опасности.

Концентрация изобутилацетата на рабочем месте Аппаратчика, установленная при проведении СОУТ в марте 2023 года, превышает предельно допустимую (табл. 4). При норме 10 мг/м³, фактическая составляет 11,63.

К источникам риска на рабочем месте Аппаратчика дополнительно нужно отнести применяемое оборудование и генерируемые им опасности при эксплуатации, параметры рабочей среды, режимы обработки сырьевых продуктов, необходимые для получения конечного продукта.

Краткая характеристика оборудования и параметров его рабочей среды приведены в таблице 5.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика применяемых методов ОПР

Наименование метода	Достоинства	Недостатки
Файна-Кинни	- Системный подход: комплексная оценка рисков, учёт различных аспектов рабочего процесса и факторов окружающей среды. - Упрощение анализа: использование формализованных таблиц и шкал повышают доступность. - Универсальность: возможно применение в различных отраслях и для разнообразных процессов. - Оценка вероятности и последствий: оцениваются количественно и вероятность возникновения риска, и последствия его реализации, что позволяет более эффективно планировать меры по минимизации рисков. - Динамичность: метод можно адаптировать к изменяющимся условиям труда и новым факторам риска.	- Субъективность оценок: оценка вероятности и последствий зависит от мнения экспертов, что может привести к искажениям результатов. - Необходимость детальной информации: для эффективного применения метода необходимо наличие точной информации о производственных процессах и условиях труда. - Сложность применения: несмотря на свою универсальность, метод требует квалифицированных специалистов для его корректного использования. - Игнорирование человеческого фактора: метод не позволяет учитывать все психоэмоциональное состояние работников, что тоже влияет на уровень профессионального риска. - Ограниченная применимость: для некоторых специфических видов рисков или в особых условиях метод может быть менее эффективен.
Методика ИПР	- Комплексный подход: возможность учёта различных аспектов профессиональной деятельности, включая имеющиеся группы факторов производства, что позволяет получить более полное представление о рисках. - Индивидуальная оценка: позволяет оценивать риск для каждого работника, с учётом его личных особенностей, состояния здоровья и условий труда. - Системность: метод основан на систематическом подходе к сбору и анализу данных, в результате можно сделать более точный прогноз. - Научная обоснованность: разработка метода опирается на научные исследования, что увеличивает его надёжность и актуальность. - Адаптивность: метод может адаптироваться к различным отраслям и условиям труда, что делает его универсальным инструментом для разных организаций.	- Сложность реализации: практическое применение метода может потребовать значительных ресурсов, как человеческих, так и финансовых, это сложности для малых и средних предприятий. - Зависимость от качества данных: метод требует наличия достоверной и актуальной информации о рабочих условиях и состоянии здоровья работников, что не всегда доступно. - Субъективный фактор: зависит от опыта и квалификации специалистов, проводящих оценку рисков. - Недоступность для всех работников: не всегда возможно провести глубокую оценку индивидуальных рисков для каждого работника, что может привести к недооценке или переоценке определенных факторов. - Ограниченность в динамике: не всегда может учитывать динамику изменений в условиях труда и здоровье работников, что необходимо для регулярного обновления оценок рисков.

Таблица 4 – Результаты СОУТ Аппаратчика

Наименование фактора	химический	биологический	АПФД	шум	инфразвук	ультразвук воздушный	вибрация общая	вибрация локальная	неионизирующие излучения	ионизирующие излучения	параметры микроклимата	параметры световая среда	тяжесть трудового процесса	напряжённость трудового процесса
Класс условий труда	3.1	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1
Итоговый класс (подкласс) условий труда	3.1													

Таблица 5 – Характеристика используемого оборудования

Оборудование	Характеристика рабочей среды и режимов работы оборудования
Реактор	Среда в корпусе токсичная. Взрывоопасная, класс опасности 3, давление в корпусе – 0,7 кгс/см ² , давление в рубашке – 3кгс/см ² , температура процесса 100 °С.
Друк фильтр	Среда в корпусе коррозионная, невзрывоопасная, класс опасности 4, давление в корпусе – 2 кгс/см ² , температура процесса 95° С..
Теплообменник	Условное давление – 2,5 кгс/см ² , температура 50 °С.
Центрифуги	Корзина имеет диаметр 850 мм, глубину 400 мм, площадь фильтрационную поверхности 1 м ² , объем 100 л. Рабочая скорость вращения 960 об/мин, максимальное количество рабочих циклов, в час - 6. Максимальное заполнение корзины - до 75 кг. Машина управляется электродвигателем 4 кВт, 380 В, 50 Гц.
Вибросито	Площадь просеивающей поверхности – 2 м ² ; Количество сит (просеивающих поверхностей) – 4 шт; Частота колебаний – 250 кол /мин; Мощность – 4 кВт; Напряжение питания электродвигателя – 380 В; Производительность – 5 т/ч.

Обозначим выявленные источники опасности в производственной среде Аппаратчика:

- вредные вещества;
- ЛВЖ;
- нагретые поверхности оборудования до температуры от +50 до +100°C
- сосуда, работающие под давлением, от 0,7 до 2,5 кгс/см² (от 0,07 до 0,25 МПа);
- вращающиеся элементы оборудования, его движущиеся части при эксплуатации, генерирующие шум, вибрацию;
- электрический ток (по ПУЭ класс помещения – особо опасное).

Установим ПР Аппаратчика, применив отечественную методику КИОиУТ, позволяющую получить числовое значение риска.

При расчете ИПР были учтены показатели: интегральная оценка условий труда (ИОУТ) Аппаратчика, его возраст (*B*), трудовой стаж во вредных условиях (*C*), состояние здоровья (*З*), а также ранг риска травмирования (*T*). Во внимание принимались данные СОУТ, наличие СИЗ у Аппаратчика, произошедшие НС за два года – 2022 и 2023. В 2022 году был зафиксирован 1 легкий НС и 2 микротравмы. В следующем – 5 случаев травматизма. Один – лёгкий с утратой трудоспособности около двух месяцев и четыре микротравмы. Профессиональные заболевания на рабочем месте Аппаратчика за рассматриваемый период зафиксированы не были.

В таблице 6 приведены исходные данные для оценки ИПР Аппаратчика.

Таблица 6 – Исходные данные для расчёта ИПР Аппаратчика

Средний возраст работников данной профессии В, лет	Трудовой стаж работы во вредных условиях С, лет	Интегральный показатель здоровья работника, З	Ранг риска травмирования, Т
45	20	2	1

При установлении значения интегрального показателя здоровья (*З*=2) было учтено, что исследуемое рабочее место относится к группе Д-II. Она зависит от группы диспансеризации после проведения ежегодного медицинского осмотра. Для этой группы возможен риск возникновения заболеваний. Их могут спровоцировать вредные факторы производства при длительном воздействии. Заболевания ОРВИ тоже не исключены. При расчёте принято допущение, что ОРВИ будет не более 2-х раз в году с нахождением работника на больничном не более 14 дней.

Сумма взвешенных значений параметров (условий труда, трудового стажа работника во вредных и (или) опасных условиях труда, его возраста и состояния здоровья) были определены по формулам действующей методики ИПР. Результаты расчёта приведены ниже.

$$B_{\phi} = 4+2+2=8. \quad (1)$$

$$B_{\phi} = 2+2+2=6. \quad (2)$$

$$PB = (B_{\phi} - B_{\phi}) / 2 = (8 - 6) / 2 = 1. \quad (3)$$

$$ИОУТ = 100 \cdot [(PB - 1) \cdot 6 + P] / 2334 = 100 \cdot [(1 - 1) \cdot 6 + 1] / 2334 = 0,043. \quad (4)$$

$$SUM V_1 \cdot ИОУТ + V_2 \cdot 3 + V_3 \cdot B + V_4 \cdot C = 0,043 \cdot 0,5 \cdot 0,067 + 0,2 \cdot 2 \cdot 0,2 + 0,1 \cdot 3 \cdot 0,2 + 0,2 \cdot 2 \cdot 0,2 = 0,2214. \quad (5)$$

$$P_T = K_{\phi} \cdot K_T = 1 \cdot 1 = 1. \quad (6)$$

$$ИПР = SUM \cdot P_T \cdot P_3 = 0,2214 \cdot 1 \cdot 1 = 0,2214. \quad (7)$$

Рассчитанный ИПР Аппаратчика по Р 2.2.1766-03.2.2 относится к высокому.

Применим метод Файна-Кинни для выявления ПР Аппаратчика. Этот метод позволяет определить вероятность подверженности и дать характеристику последствий причиненного риска. Его преимуществом в отличие от матричного метода является наглядность и получение количественной оценки риска

$$ИПР = B_p \cdot P_{\phi} \cdot P_c \quad (8)$$

где ИПР – индекс профессионального риска, B_p – вероятность опасности, P_{ϕ} – подверженность опасности, P_c – последствия опасности [21].

При оценке риска было учтено, что по №116-ФЗ анализируемое предприятие относится к 3 классу промышленной безопасности. На основании того, что для реализации технологического процесса необходимы сосуда, работающие под давлением, ЛВЖ, опасные вещества.

Применив методику Файна-Кинни, была установлена итоговая величина ПР, которая составила 191,45. Это говорит о том, что риск рабочего относится к категории средний существенный риск.

Обсуждение. Таким образом, полученное итоговое значение ПР Аппаратчика синтеза 6 разряда с применением нескольких методов, входящих в перечень рекомендованных Приказом N 926, показал неоднозначный результат. Оценённый риск матричным методом соответствует допустимому, по методике оценки ИПР – относится к высокому, методом Файна-Кинни – средний существенный риск. Перечень мероприятий, необходимых для снижения риска по полученным данным, должен существенно отличаться: при высоком и среднем существенном значениях риска потребуются запланировать больший объём материальных затрат на мероприятия и средства для его минимизации.

Условно достоверными можно считать все полученные значения ПР. Разницу в результатах оценки можно объяснить тем, что каждая методика отличается перечнем исходных данных, шкалой оценки рисков, а также присутствия характерного для рассматриваемых методов недостатка – субъективного мнения (далее – СМ). Влияние СМ проявится в независимости от того, пригласит ли руководитель предприятия экспертов организации, специализирующейся на проведении ОНР, или оценка будет проводиться своими силами. Итоговый результат может отличаться.

К наиболее значимым причинам, влияющим на формирование СМ, можно отнести не только

данные самого эксперта, но и время, отведённое на реализацию процедуры.

Рассмотрим формирование СМ эксперта, который является сотрудником организации, в которой необходимо провести ОПР. С момента введения обязательного установления процедуры прошло около трёх лет. Спектр предлагаемых методов ОПР превышает три десятка. Методики и качественных, и количественных оценок риска имеют свои особенности, на освоение которых требуется время. В условиях производства это не единственная задача, которая входит в должностные обязанности специалиста. Источником информации по проведению процедуры ОПР, в т.ч. и выбора метода, в подавляющем большинстве, служат интернет-ресурсы. Предлагаемые сайтами компаний шаблоны карт ПР для ряда профессий и примерных перечней опасностей в сочетании с недостаточной подготовкой эксперта могут повлиять на выявление всех источников опасностей. Отсутствующие данные в шаблонах могут быть не учтены.

Привлечение экспертов специализированной организации не всегда гарантирует высокую достоверность результатов ОПР. В этом случае СМ эксперта тоже зависит от его квалификации, опыта, кругозора, умения учитывать особенности конкретного производства при оценке рисков, а также такого личного качества, как ответственность. Исключать влияние установленных договором сроков на проведения ОПР экспертами тоже нельзя. Дефицит времени может повлиять на качество процедуры ОПР ещё на 1-м этапе при идентификации опасностей.

Недостаток времени может повлиять на выбор собственно метода ОПР. Часто руководствуются минимумом критериев при выборе метода оценки риска. Предпочтение отдаётся простым в применении методов: матричного, Файна-Кинни, Элмери, чек-листа и др.

Указанные причины оказывают влияние на формирование СМ эксперта проведении процедуры ОПР, включая выбор метода.

Эти обстоятельства могли иметь место на рассматриваемом предприятии.

Установленный риск Аппаратчика, как отмечалось, относится к допустимому. Специалисты предприятия руководствовались положениями выбранной методики и учитывали свои наблюдения, т.е. опирались на своё СМ. Например, они могли подсознательно принимать во внимание личные и профессиональные качества не только Аппаратчика, но и других работников предприятия, обеспечивающих функционирование оборудования и вспомогательных устройств, а также тех сотрудников, которые занимаются контролем качества веществ и продуктов на всех технологических стадиях, оценивая их как высокие.

Поэтому для ОПР и, далее, управления им при наличии на рабочем месте источников опасности

высокого уровня (в данном случае – опасных объектов, нагретые поверхности их стенок, поражение электрическим током), вероятность реализации которых не велика, но последствия значимы, стоит, как минимум, применить дополнительно такие методы анализа риска, как, например, «галстук-бабочка», «дерево решений (причин, событий)», анализ ошибок персонала [3]. Это должно помочь выявить даже незначительные, на первый взгляд, события, источники опасности, требующие более тщательного изучения и мониторинга. Но на это потребуются и дополнительное время, и навыки специалистов предприятия для овладения этими методами, либо привлечение сторонних экспертов.

Для работников с наличием на их месте источников повышенного риска рекомендуется применять количественные методы ОПР. Поиском и разработкой оптимального метода ОПР, учитывающего дополнительные показатели и критерии, помимо указанных на рисунке 1, для работников ОПО занимаются многие исследователи [22-26]. В рамках данной работы сложно охватить весь спектр, существующих методических разработок.

Работа по выявлению ИПР для допустимых условий труда направлена в большей степени на выявление страховых случаев [27].

Но всё же основной целью проводимых исследований является минимизация ПР на каждом рабочем месте.

Анализ научных публикаций показал, что более перспективным является применение информационных систем и технологий для оценки и управления ПР [28-30].

Исключить субъективность при установлении ПР, учесть все случайные события, применить сложные математические вычисления, провести корреляцию между условиями труда, НС и микротравмами, медицинскими осмотрами и нарушением здоровья работника и многое другое, а также сэкономить время возможно только применив ИТ-технологии. Стоит отметить, что это позволит эффективно и экономично управлять ПР. В рамках национальной цели "Цифровая трансформация" [31] для повышения эффективности СУБиОТ предложено применять электронный документооборот, мониторить реализацию мероприятий по ОТ, осуществлять предсменную проверку знаний работников по безопасным приёмам работы, проводить видеонаблюдение за соблюдением предписаний должностных инструкций работников в зонах с повышенными источниками опасности [32].

О преимуществах цифровизации в своей статье подробно изложили Тимофеев С.С., Тимофеева С.С. [33]. Авторы предложили активнее внедрять цифровые технологии и обосновали, что применение цифровизации в разных аспектах повысит культуру безопасности труда, позволит снизить риски.

В лаборатории по охране труда БГТУ им. В.Г. Шухова разрабатывается адаптивная система для управления безопасностью труда и профес-

сиональными рисками [34-35]. Система направлена на снижение НС в различных отраслях промышленности за счёт создания базы исходных данных, позволяющей учитывать все возможные источники опасности. Специалистами лаборатории были оцифрованы все нежелательные происшествия на предприятиях и организациях Белгородской области с 2007 года. Для пополнения базы данных при ОПР важную роль выполнит электронное документирование и обмен данными результатов СУОТ, случаев и причин травмирования, информация о случаях и причинах травмирования, в том числе микро-, о результатах медицинских обследований и пр.

Выводы. Подводя итоги, можно отметить, что на данном этапе внедрение процедуры ОПР в РФ уже дало свои пока небольшие, но положительные результаты в снижении показателей травматизма. Необходимость продолжать исследовать этот вопрос и выявлять недостатки, сохраняется. Снижение травматизма и рисков профессиональных заболеваний – это проблема комплексная, зависит не только от процедуры ОПР. Но выбор оптимального метода оценки ПР позволит выявлять скрытые опасности на каждом рабочем месте и формировать безопасную рабочую среду. Возможно, потребуется определённый период для разработки простого в применении универсального метода ОПР, не зависящего от субъективных факторов. Но на сегодняшний день применение информационной системы для управления безопасностью труда и профессиональными рисками является более надёжным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Усикова О.В., Майданкина Д.К. Анализ реализации концепции Vision Zero на территории Российской Федерации // Экономика труда. – 2020. – Том 7. – № 12. – С. 1323-1336.
2. Файнбург Г.З. Охрана труда в кардинально меняющемся мире... (Размышления о современных проблемах охраны труда) // Безопасность и охрана труда. – 2019. – № 3 (80). – С. 13-18.
3. Приказ Минтруда России от 28.12.2021 N 926 "Об утверждении Рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков" // Документ предоставлен: КонсультантПлюс. [Электронный ресурс] <https://www.consultant.ru/document/> (дата обращения: 3.09.2024).
4. Бухтияров И.В., Бобров А.Ф., Денисов Э.И. [и др.] Методы оценки профессионального риска и их информационное обеспечение. Гигиена и санитария. – 2019. – № 98 (12). – С. 1327-1330.
5. Р. 2.2.1766-03. «Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки». Введено 2003-1-11. М.: Изд-во стандартов, 2003. – 15 с.
6. Патент № 2 440 020 (13) C1 (51) МПК A61B 5/00(2006.01). Способ оценки профессионального риска для здоровья рабочих горячих цехов: № 2010130068/14: заявл. 19.07.2010: опубл. 20.01.2012 / Жидков В.Д. – 11 с.
7. Афанасьева, И.В. Комплексная оценка риска для здоровья персонала от воздействия вредных и опасных факторов. Химический фактор [Текст]: монография / И.В. Афанасьева. Ухта: УГТУ. – 2016. – 72 с.
8. Ульянов А.И. Методика снижения профессионального риска в строительстве по фактору тяжести труда: Автореф. канд. дисс: Специальность 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) // Волгоград, 2020. – 18 с.
9. Левашов С.П. Анализ и разработка критериев оценки и оценивания рисков профессионального травматизма на основе «Кодекса лучшей практики» // Анализ риска здоровью. – 2017. – № 2. – С. 37-46.
10. Маженов С.А. Оценка и управление профессиональными рисками на основе модифицированного метода контрольных листов // Экономика труда. – 2023. – Том 10. – № 12. – С. 2145-2156.
11. Файнбург Г.З. Методы оценки профессионального риска и их практическое применение (от метода Файна-Кинни до наших дней) // Безопасность и охрана труда. – 2020. – №2. – С.25-41.
12. Шарманов В.В., Симанкина Т.Л. Матрично-индексный подход в вопросах оценки уровня травматизма на объектах строительства // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2022. – № 1. – С. 75-82.
13. Тимофеева С.С. Современные методы оценки профессиональных рисков и их значение в системе управления охраной труда // XXI век. Техносферная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 14-24.
14. Бухтияров И.В., Измеров Н.Ф., Тихонова Г.И., Чуранова А.Н. Производственный травматизм как критерий профессионального риска // Проблемы прогнозирования. – 2017. – № 5(164). – С. 140-149.
15. Кобцева Л.В., Дорохова Н.Д. Анализ причин и пути снижения производственного травматизма и профессиональных заболеваний в Алтайском крае // Безопасность жизнедеятельности. – 2021. – № 3 (243). – С. 14-17.
16. Контарева В.Ю., Белик С.Н. Профессиональная заболеваемость и производственный травматизм у работников пищевой промышленности // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 1. – С. 32-40.
17. Пушенко С.Л., Гапонов В.Л., Кукаренко В.А. Анализ производственного травматизма в строительной индустрии и пути его снижения // Безопасность техногенных и природных систем. – 2022. – № 2. – С. 24-30.
18. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда. URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 7.09.2024).
19. Федеральный закон №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) // Документ предоставлен: КонсультантПлюс. [Электронный ресурс] <https://www.consultant.ru/document/> (дата обращения: 3.09.2024).
20. Приказ Минздравсоцразвития РФ от 28.03.2006 N 208 "Об утверждении Единого тарифно-квалификационного справочника работ и профессий рабочих, выпуск 24, раздел "Общие профессии химических производств" Приложение к Приказу Минздравсоцразвития РФ от 28 марта 2006 г. N 208 Единый тарифно-квалификационный справочник работ и профессий рабочих. Выпуск 24: Раздел "Общие профессии химических производств" // Документ предоставлен: КонсультантПлюс. [Электронный ресурс] <https://www.consultant.ru/document/> (дата обращения: 15.09.2024).
21. Министерство труда и соцразвития Новосибирской области. Управление труда. «Оценка профессиональных рисков: памятка» / Новосибирск. 2020. – 23 с.
22. Черный К.А., Файнбург Г.З., Розенфельд Е.А. Методологические проблемы проведения оценки профессиональных рисков на горнорудных предприятиях и их решение // Недропользование. – 2021. – Т.21, №4. – С. 193-200.
23. Андреева Е.Е. Научное обоснование и разработка системы оценки и управления профессиональными рисками на предприятии авиационного машиностроения // Автореф. канд. дисс. – Специальность 14.02.04 – Медицина труда. М.: Научно-исследовательский институт медицины труда РАМН, 2012. – 24 с.
24. Кухта А.И., Маматченко Н.С. Комплексный метод оценки степени профессиональных рисков на предприятии // Безопасность техногенных и природных систем. – 2018. – №1. – С.18-27.
25. Сетко Н.П., Мовсегоз С.В., Булычева Е.В. Анализ ИПР здоровью рабочих основных профессий НПП // Анализ риска здоровью. – 2020. – №3. – С.132-138.
26. Гендлер С.Г., Габова В.В., Бабырь Н.В., Прохорова Е.А. Обоснование технических решений по снижению производственного травматизма в лавах угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-

технический журнал). – 2022. – № 1. – С. 5-19.

27. Шендакова Т.А., Алибекова И.В. Индивидуальный профессиональный риск работников в допустимых условиях труда // Проблемы анализа риска. – Т. 17. – 2020. – № 2. – С. 86-93.

28. Барков А.Н. Информационная система оценки профессиональных рисков в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2021. – Т. 11, № 4. – С. 26-45.

29. Зонова Н.О., Сердюк В.С., Фомин А.И. Разработка цифрового инструмента для автоматизации процессов оценки профессиональных рисков с учетом влияния человеческого фактора // Вестник (научно-технический журнал). – 2022. – №2. – С.45-59.

30. Зайцева Н.В., Шур П.З., Алексеев В.Б. [и др.] Методические подходы к оценке категорий профессионального риска, обусловленного различными видами нарушений здоровья работников, связанными с комплексом факторов рабочей среды и трудового процесса // Анализ риска здоровью. – 2020. – № 4. – С. 23-30.

31. Семейкин А.Ю., Кочеткова И.А., Дроздова А.О., Чернышов А.В. Моделирование и управление профессиональными рисками на промышленных предприятиях с использованием экспертных информационно-аналитических систем поддержки принятия решений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S7. – С. 164-174.

32. Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474 “О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года” // Документы ленты Прайм: Гарант.РУ (garant.ru), (дата обращения: 19.09.2024).

33. Тимофеев С.С., Тимофеева С.С. Цифровое будущее охраны труда // XXI век. Техносферная безопасность. – 2022. – Т. 7. – № 1. – С. 51-62.

34. Klimova E.V., Semeykin A.Y., Nosatova E.A. Prospects for the Introduction of Micro Training in the Occupational Safety Management System // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – P. 072009.

35. Semeykin, A.Y., Klimova E.V., Kochetkova I.A. Forecasting and Managing Professional Risks Using Information-Analytical Systems Based on Fuzzy Logic Methods // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – P. 052083.

Статья публикуется при поддержке программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Статья поступила в редакцию 06.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 658.382.3:004

EDN: WYDOTQ

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА:
ТЕКУЩИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 3207-2776

AuthorID: 1274243

ORCID: 0009-0001-5760-9541

ЗИЯТДИНОВА Сюмбель Фанилевна, аспирант, ассистент кафедры «Промышленная безопасность»

Казанский национальный исследовательский технологический университет

(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68, e-mail: ibr.sumbel@yandex.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)

SPIN: 4398-2595

AuthorID: 276360

ORCID: 0000-0002-4132-7902

БОГАЧ Виталий Васильевич, кандидат химических наук,

и.о. заведующего кафедрой «Промышленная безопасность»

Казанский национальный исследовательский технологический университет

(420015, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 68,

e-mail: BogachVV@corp.knrtu.ru)

SPIN: 3127-1541

AuthorID: 288426

ORCID: 0000-0003-4206-019

ВИНОГРАДОВ Василий Юрьевич, доктор технических наук,

профессор кафедры «Промышленная и экологическая безопасность»

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

(420021, Россия, Республика Татарстан, Казань, улица Карла Маркса, 10, e-mail: vawin@mail.ru)

Аннотация. В данной статье нашли отражения понятия, связанные с интеллектуальным видеонаблюдением, так называемым компьютерным зрением. Приведены примеры успешного внедрения дистанционных технологий наблюдения за работниками. По результатам анализа применения вышеупомянутых технологий делается вывод о том, что компьютерное зрение позволяет снизить количество опасных действий работников и уменьшить риски, связанные с их травмированием. При этом оно также позволяет не проводить регулярные инспекции на рабочих местах, менее травмоопасно использовать применяемое оборудование, способствует соблюдению работниками требований безопасности, установленных на предприятии нормативными и локальными документами. Анализ примеров применения компьютерного зрения в целях безопасности производства позволил выявить основные трудности при его внедрении и использовании и рассмотреть перспективы его дальнейшего развития для обеспечения безопасности производственных процессов. Выявлены основные текущие проблемы применения компьютерного зрения в области безопасности производства, к которым относятся технические ограничения, вопросы обработки больших объемов данных, их хранение и конфиденциальность. Отдельное внимание уделено таким техническим ограничениям как ограниченная точность распознавания объектов в сложных условиях, сложность процесса обработки видео в реальном времени, совместимость с имеющимися системами безопасности. В результате проведенного исследования сделан вывод о потенциале использования компьютерного зрения при соблюдении работниками требований производственной безопасности в повседневной деятельности предприятия и снижении количества несчастных случаев и профессиональных рисков при выполнении различного рода работ.

Ключевые слова: компьютерное зрение, безопасность труда, дистанционный контроль, снижение травматизма, обеспечение безопасности, человеческий фактор.

**COMPUTER VISION IN THE FIELD OF INDUSTRIAL SAFETY:
CURRENT PROBLEMS AND PROSPECTS**

© The Author(s) 2025

ZIYATDINOVA Syumbel Fanilevna, postgraduate student, assistant of the Department of Industrial Safety

Kazan National Research Technological University

(420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 68, e-mail: ibr.sumbel@yandex.ru)

KHAIRULLINA Laysan 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)

BOGACH Vitaly Vasilyevich, candidate of chemical sciences, acting head of the Department of Industrial Safety
Kazan National Research Technological University

(420015, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 68, e-mail: BogachVV@corp.knrtu.ru)

VINOGRADOV Vasily Yuryevich, doctor of technical sciences,
professor of the Department of Industrial and Environmental Safety

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

(420021, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, Karl Marx Street, 10, e-mail: vavin@mail.ru)

Abstract. This article reflects the concepts associated with intelligent video surveillance, the so-called computer vision. Examples of successful implementation of remote employee surveillance technologies are given. Based on the analysis of the application of the above-mentioned technologies, it is concluded that computer vision can reduce the number of dangerous actions of workers and reduce the risks associated with their injury. At the same time, it also eliminates the need for regular inspections at workplaces, makes it less dangerous to use the equipment used, and helps workers comply with safety requirements established at the enterprise by regulatory and local documents. An analysis of examples of computer vision application for production safety purposes made it possible to identify the main difficulties in its implementation and use and consider the prospects for its further development to ensure the safety of production processes. The main current problems of computer vision application in the field of production safety are identified, which include technical limitations, issues of processing large amounts of data, their storage and confidentiality. Special attention is paid to such technical limitations as limited accuracy of object recognition in difficult conditions, the complexity of the real-time video processing process, compatibility with existing security systems. As a result of the conducted study, a conclusion was made about the potential of using computer vision in ensuring that employees comply with industrial safety requirements in the daily activities of the enterprise and reducing the number of accidents and occupational risks when performing various types of work.

Keywords: computer vision, occupational safety, remote control, injury reduction, safety, human factor.

Для цитирования: Зиятдинова С.Ф. Компьютерное зрение в области безопасности производства: текущие проблемы и перспективы / С.Ф. Зиятдинова, Л.И. Хайруллина, В.В. Богач, В.Ю. Виноградов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 210-218. – EDN: WYDOTQ.

Введение. Интеллектуальное видеонаблюдение, анализ изображений и биометрические технологии значительно опередили возможности профессионально обученных специалистов и активно используются как в обычной, так и в научно-исследовательской и конечно в производственной жизни человека. Компьютеры не устают, не отвлекаются и соответственно безусловно позволяют снизить влияние так называемого «человеческого фактора» на различные производственные процессы. На сегодняшний день можно привести много примеров взаимодействия искусственного интеллекта с человеком в различных сферах. С помощью искусственного интеллекта давно успешно фиксируют нарушения правил дорожного движения, распознают лица, корректируют фотографии, переводят иностранные тексты, распознают эмоциональное состояние человека, считывают его физиологические параметры и многое другое. Данные технологии, если можно так выразиться «понимают» события, «видят» объекты и отличают их друг от друга. Поэтому их применение на производстве растет с каждым днем, а предприятия очень заинтересованы в их тиражировании на разных участках технологического процесса и видах работ [1-9].

Указом Президента от 10 октября 2019 г. № 490

«О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» [10] согласно внесенным изменениям, доля сотрудников с навыками владения искусственным интеллектом должна вырасти до 80% к 2030 году, что также говорит о развитии данных технологий. Поэтому применение компьютерного зрения для промышленных предприятий стало особенно актуальным по нескольким причинам: контроль качества, увеличение производительности, снижение затрат, анализ данных, гибкость и адаптивность, интеграция с другими технологиями, поддержка инноваций и безусловно безопасность на рабочем месте. В последнем случае системы компьютерного зрения могут быть использованы для мониторинга безопасности на производственных площадках, выявляя потенциальные опасности и предотвращая несчастные случаи.

Методология. Для понимания возможностей применения технологий компьютерного зрения на производстве был проведен анализ применяемых на ряде предприятий кейсов, что позволило выявить текущие проблемы применения компьютерного зрения и возможные пути их решения.

Результаты. Прежде чем «погружаться» в тему необходимо было определиться с терминологическим аппаратом. С целью различения применяемых на

сегодня терминов в области компьютерного зрения был проведен их анализ (табл. 1).

Таким образом очень трудно на сегодняшний день разделить понятия видеоаналитики, машинного и компьютерного зрения. Можно лишь констатировать тот факт, что компьютерное зрение – это область или технология искусственного интеллекта, которая связана с обработкой видео и изображений. Последующий анализ и обработка изображений при этом процессе – это своего рода манипуляция с изображениями для улучшения их качества или извлечения информации. Также компьютерное зрение позволяет сегментировать, то есть разделять изображения на несколько частей для упрощения анализа. При организации и обучении такого рода нейросетей очень важно научить искусственный

интеллект обнаруживать объекты, идентифицировать их и локализовать объекты в изображении. Следующим этапом компьютерного зрения является классификация изображений, предполагающая определение категории, к которой принадлежит изображение. Также очень важными с точки зрения технических параметров являются характеристики самой камеры, которые непосредственным образом влияют на качество «захваченных» изображений (например, фокусное расстояние, экспозиция) поэтому ее глубина резкости – области в изображении, должна быть четкой и сфокусированной. При этом необходимо отметить, что результатом работы компьютерного зрения, несмотря на его название, является не картинка, а численное выражение качества и размера того, за чем наблюдают.

Таблица 1 – Терминология компьютерного зрения

Термин	Определение	Ссылка (источник)
Искусственный интеллект	комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека	Ст. 2 Федерального закона от 24.04.2020 № 123-ФЗ [11]
Компьютерное (машинное) зрение	способность функционального блока получать, обрабатывать и интерпретировать визуальные данные	ГОСТ Р 59277-2020 [12]
Интеллектуальное видеонаблюдение	система, использующая технологии искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа видеопотока в реальном времени	Интеллектуальные системы видеонаблюдения в комплексах безопасности [13]
Техническое зрение	частный случай интеллектуального видеонаблюдения, отличающийся наличием управляющего воздействия на производственную линию (например, автоматическая отбраковка продукции) и как следствие требующий выделенного сервера интеллектуального видеонаблюдения, находящегося в непосредственной близости с производственной линией	ГОСТ Р 70652-2023 [14]
Видеоаналитика	набор технологий, позволяющий автоматизировать анализ видео и изображений	ГОСТ Р 59385-2021 [15]
Машинное обучение	метод, позволяющий моделям обучаться на данных для выполнения задач компьютерного зрения	ГОСТ Р 59895-2021 [16]
Нейронная сеть	нейронная сеть (искусственная нейронная сеть, ИНС, нейросеть) – математическая модель, а также её программное или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма	Большая российская энциклопедия [в 35 т] [17]
Сверточные нейронные сети (CNN)	тип нейронной сети, специально разработанный для обработки изображений	ГОСТ Р 71476-2024 [18]
Трекинг	отслеживание положения объекта в последовательности кадров	ГОСТ Р 59385-2021 [15]
Аугментация данных	метод увеличения объема обучающего набора данных путем применения различных трансформаций к изображениям	ГОСТ Р 59898-2021 [19]

Машинное же зрение активно используется в различных сферах промышленности: сборка, управление, контроль с использованием тех же роботов в качестве «облегчения» деятельности сотрудников; обнаружение различных дефектов на начальных стадиях производственного процесса; сортировка и учет продукции; контроль выполнения требований локальных документов и иных нормативных актов; контроль качества продукции и др. [20].

Данные технологии как бы они не назывались, выявляют предпосылки, которые человек может пропустить. Скорее всего в ближайшем будущем усовершенствованный алгоритм машинного зрения будет выполнять задачи наравне с человеческим. Кроме того, эксперты отмечают, что затраты на

внедрение технологии окупаются, по разным оценкам, в течение двух лет [21], а исключение присутствия человека в системе безусловно повышает уровень безопасности.

В рамках статьи авторов больше интересует так называемое компьютерное зрение. Анализ различных источников позволяет обобщить ключевые задачи, для решения которых его используют на производстве (рис. 1) [20].

При этом, например, такая задача как детектирование может решаться как с помощью классических методов (распознавание лиц и других объектов, детектирование пешеходов и др.) так и современных методов на основе глубокого обучения (детектирование в реальном времени, сочетание

скорости и точности и т.д).

А основными типами сегментации являются:

- сегментация по цвету (использование цветовых моделей для разделения объектов на основе их цветовых характеристик);
- сегментация по границам (определение границ объектов на изображении);
- сегментация на основе области (группировка пикселей, основываясь на их схожести (цвет, текстура и т.д.);
- сегментация на основе кластеризации (группировка пикселей в кластеры);
- сегментация с использованием глубокого обучения (чаще используется в медицинской визуализации для сегментации изображений).

Компьютерное зрение может содержать различные технологии и соответственно элементы, которые используются при его применении. Некоторые из них отражены на рисунке 2 [22].

Важно отметить, что для «захвата» изображений

и видео применяются специализированные камеры и сенсоры. Эти устройства могут быть установлены на оборудовании, роботах, местах движения сотрудников для мониторинга производственных процессов. Затем для анализа и интерпретации полученных изображений используются различные алгоритмы обработки, которые выявляют различные заданные объекты и образцы, оценивают их качество и т.д. Можно сказать, что далее происходит обучение компьютерного зрения с помощью нейронных сетей и машинного обучения, что в дальнейшем позволяет им распознавать и классифицировать объекты, адаптироваться к новым условиям и повышать точность съемки с течением времени. При этом очень важны аспекты интеграции этой технологии с другими системами: автоматизацией производства, системой управления качеством и др. При организации и внедрении компьютерного зрения на производстве очень важен момент обмена данными и вопросы координации работы между различными системами.

Классификация (присвоение объекту определённого класса, которую потом нейросеть определяет в одну из групп, которую знает (человек, инструмент, цвет)

Локализация (определение местоположения объекта)

Детектирование (идентификация и локализация объектов на изображениях или в видеопотоке)

Сегментация (разделение изображения на несколько значимых частей или объектов)

Рисунок 1 – Задачи компьютерного зрения

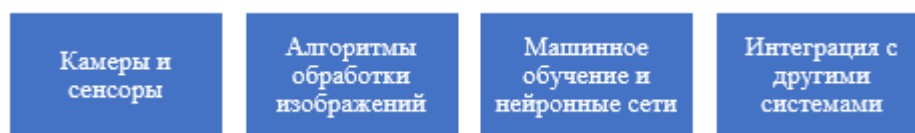


Рисунок 2 – Технологии компьютерного зрения на производстве

В промышленной безопасности совместимость матричных камер с системами видеонаблюдения специалисты называют полезным решением, особенно если IP-видеокамеры не справляются с задачей. Но 5 секунд, предусмотренные на формирование кадра и передачу в устройство анализа, абсолютно недопустимы для корректного контроля безопасности на предприятии [21]. Крайне важным элементом системы компьютерного зрения является и сенсор. Чтобы технология работала корректно и вовремя выполняла свои функции, сенсоры должны иметь высокую скорость захвата изображений, поэтому здесь учитывают, какое количество байт вырабатывает устройство и какой заложен динамический диапазон. В зависимости от сферы установки сенсоры различаются и функциональной составляющей: подавление мерцания светодиодов, большие скорости, наличие функцией захвата нескольких частей

кадров и т.д. Не нужно углубляться в техническую составляющую, чтобы понимать, что основным требованием к камерам и таким системам в целом является защищённый конструктив и гарантия на использование минимум 3 года. Как видно даже из краткого обзора конструкция системы машинного зрения многогранна, поэтому элементы для каждой из её функций стоит выбирать очень вдумчиво, учитывая все аспекты использования.

Ниже представлены факторы почему компьютерное зрение становится популярной технологией искусственного интеллекта (рис. 3).

Компьютерное зрение на основе распознавания лиц в настоящее время широко используется для контроля доступа в различные помещения. Другими распространенными областями применения компьютерного зрения являются анализ рентгеновских снимков, обнаружение брака, контроль

качества производимых изделий. Все эти сферы применения позволяют сделать вывод о том, что компьютерное зрение, по сути, может «увидеть» то, что может не заметить человек, например определить верные расстояния, проверить размеры, считать маркировку и т.д., а это, в свою очередь, ведет к повышению производительности за счет снижения ошибок и брака или позволяет точнее определить дефекты и различные отклонения. Само распознавание, как правило, занимает несколько секунд, но интересен его конечный результат, интерпретация и форма оповещения. Специалисты отмечают, что без компьютерного зрения в скором времени невозможно будет развитие беспилотного транспорта и роботов.

В последнее время все технологии распознавания начали применяться в целях повышения безопасности производственного процесса и сохранения жизни и здоровья работников. Например, очень часто компьютерное зрение применяется при наблюдении за тем, как работники носят и применяют средства индивидуальной защиты или за тем, чтобы при выполнении работ, требующих высокой концентрации внимания, работники не отвлекались от своих обязанностей. И в том, и в другом случае система может выслать соответствующие предупреждения.

Краткий обзор сфер применения технологий компьютерного зрения на основе искусственного интеллекта в производственной сфере в целях повышения безопасности труда представлен в таблице 2.

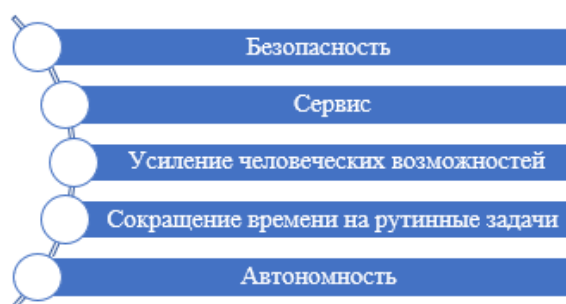


Рисунок 3 – Факторы популярности компьютерного зрения

Таблица 2 – Применение технологий компьютерного зрения на производстве на основе искусственного интеллекта

Разработка	Суть	Предприятие
Система контроля за использованием средств индивидуальной защиты	Система (может иметь дополнительный модуль Face ID, идентифицирующий персонал по лицу) предназначена для определения отсутствующих на работнике средств индивидуальной защиты при выполнении различного рода работ, с последующей передачей сигнала непосредственным руководителям	ПАО «ГМК «Норильский никель», АО «Концерн Росэнергоатом» [23,24]
Системы предотвращения нахождения персонала в опасных зонах	При помощи специальных программ, установки специальных датчиков, RFID-меток (транспондеров), в режиме реального времени системы анализируют изображение с видеокамер для определения нахождения людей в зоне риска или безопасных расстояний сближения человека и оборудования. Далее возможны различные варианты: поступление вибросигнала с включением световой и звуковой сигнализации с одновременной блокировкой механизмов оборудования или же полная остановка оборудования в случае фиксации нарушений	ПАО «Северсталь» [25], Магнитогорский металлургический комбинат [24]
Система видеоанализа соблюдения требований техники безопасности и промышленной безопасности	Умеет распознавать 26 видов нарушений по 19 возможным параметрам (ношение каски, подборочного ремня, специальных перчаток, брюк, обуви; ношение и положение защитного щитка (опущен, поднят, частично поднят), трекинг положения работника относительно щитов КРУ). Система различает несколько типов спецодежды.	Кольская АЭС [24, 26]
Система дистанционного контроля промышленной безопасности (СДКПБ)	Комплекс технических и программных средств, предназначенных для мониторинга состояния объектов инфраструктуры предприятия с целью обеспечения безопасности труда и предотвращения аварийных ситуаций, путем ранжирования происходящих событий по уровням опасности, для обнаружения потенциальных проблем	ЗАО «КРОК инкорпорейтед» [27]
Система контроля качества деталей	Видеоаналитика всех поверхностей деталей/оборудования позволяет определить годность изделия и выявить все дефекты	Объединенная двигателестроительная корпорация (входит в Ростех) [28]

Даже из краткого анализа видно, что решения в области интеллектуальной видеоаналитики способны решить большое количество задач. Специалисты отмечают, что такие решения позволяют уменьшить количество работников, задействованных в

наблюдении за установленными на предприятии камерами до 75%; снизить производственный травматизм до 40%; сократить время расследования инцидентов до 10 раз [21]. Однако успешный опыт применения компьютерного зрения, а также

проведенный анализ позволяет выявить и текущие проблемы его применения. К ним относят, прежде всего:

1. Технические ограничения.
2. Обучение и адаптация моделей.
3. Сопротивление сотрудников новым технологиям.
4. Необходимость обучения персонала для работы с системами компьютерного зрения.
5. Этические дилеммы при использовании технологий слежения.

Обсуждение. Постараемся рассмотреть выявленные проблемы немного поподробнее.

Например, технические ограничения применения компьютерного зрения связывают с такими проблемами как:

- ограниченная точность распознавания объектов в сложных условиях (плохое освещение, загрязнения);
- сложность в обработке видео в реальном времени;
- интеграция с существующими системами;
- совместимость с устаревшими системами безопасности, а следовательно возникновение необходимости адаптации имеющейся инфраструктуры;
- сложность обработки данных и конфиденциальность;
- вопросы хранения и обработки больших объемов данных;
- защита персональных данных и соблюдение законодательства.

Одним из самых сложных вопросов, связанных с компьютерным зрением, является проблема обучения и адаптации созданных и имеющихся моделей. Для эффективной работы нейронных сетей, а компьютерное зрение напрямую с ними связано, необходимо наличие большой и качественной базы данных. При этом количество этих данных может быть колоссальным. В этой связи при решении производственных задач в области безопасности производства возникает резонный вопрос обучения таких систем «с нуля». Анализ может показать, что собрать такое же количество данных возможно не получится, поэтому специалисты рекомендуют брать «предобученные» нейронные сети с готовой архитектурой, видоизменить их для сформулированной задачи и дообучать их на текущих данных. Такие предобученные нейросети можно найти в открытых библиотеках *Keras*, *Python*, *GitHub* [20].

Однако для некоторых производств такой вариант может быть неприемлем, так как для качественного анализа необходимо большое количество уникальных примеров. Поэтому недостаток таких данных для обучения моделей вызывает необходимость их сбора практически «вручную» или использование современных методов для их генерации. При этом, конечно, нужно понимать и осознавать, что данные процессы очень долгие и сложные и возможно, что их придется повторять постоянно при постановке

других задач. Поэтому сложности в адаптации имеющихся алгоритмов к специфике различных производств безусловно очень актуален.

После сбора данных на предприятии, где уже запланировано внедрение качественной системы компьютерного зрения, нужно подумать и о том, где хранить получаемую информацию. Одна картинка, например, 20 Мб, 100 кадров в секунду — это колоссальные объёмы информации [21]. Где все это хранить? В архивах, облачных системах? Возникает еще один вопрос: а нужно ли предприятию решать эту проблему, тратить на это временные и финансовые ресурсы или поставщики оборудования могут предоставить хранилища для информации? Это зависит от критичности информации и политики предприятия, и как показывает опыт крупных предприятий они «замыкают» контур внутри своей инфраструктуры. И проблема даже не в том, как хранить, а в том, что именно собирать — метаданные или фрагменты целиком? Поэтому предприятие должно само решить, что ему эффективнее в конкретном проекте: аренда места поставщиков или собственное хранилище. Как показывает анализ имеющейся на сегодняшний день практики, хранение происходит с использованием стандартных баз и систем хранения данных.

Также не менее обсуждаемы и этические дилеммы при использовании технологий слежения. Возникает резонный вопрос: а законно ли устанавливать камеры на рабочем месте? В нормативных документах отмечено, что это возможно при условии, что цели наблюдения заранее определены, конкретны, правомерны и связаны с трудовым процессом [29].

Чаще всего камеры на предприятии устанавливают для проверки соблюдения пропускного режима, а в последнее время для контроля за соблюдением требований производственной безопасности (охрана труда, пожарная и промышленная безопасность, транспортная безопасность). Анализ практического применения видеокамер позволяет сделать вывод о том, что их установка и использование ведет к более добросовестному выполнению работниками своих обязанностей, особенно если их деятельность связана с четким выполнением инструкций и различных требований. Видеоконтроль позволяет проанализировать действия работников и следование их требованиям, установленных в локальных актах предприятия.

Если обратиться к судебной практике, то чаще всего вопросы незаконного видеонаблюдения на предприятиях связаны требованиями демонтажа камер. Поэтому на предприятиях и в организациях камеры должны стоять в местах, связанных с трудовой деятельностью работников, а не в комнатах отдыха, раздевалках, душевых. Поэтому работодателю в этом случае рекомендовано действовать в отраженной ниже последовательности [30]:

1. Создать локальный документ, регулирующий порядок видеонаблюдения на предприятии. Этот

документ или отдельные его пункты в Правилах внутреннего трудового распорядка (далее ПВТР) должны охватывать все аспекты получения биометрических данных сотрудников. С этими документами работников необходимо ознакомить под подпись. Рекомендуемые элементы по видеонаблюдению в упомянутых документах отражены на рисунке 4 [30].

2. Уведомить работника о видеонаблюдении. Это лучше сделать за два месяца в виде отдельного документа, составленного в произвольной письменной форме, который после его подписания работником позволит оформить дополнительное оглашение к трудовому договору. Уведомление можно вручить работнику лично, под подпись, либо отправить заказным письмом. Если же это вновь принятый

работник, то его необходимо ознакомить с Положением о видеонаблюдении под подпись.

3. Получить согласие на обработку биометрических персональных данных. Закон о персональных данных [ч. 4 ст. 9, 31] четко регламентирует содержание информации в согласии, где также могут быть указаны варианты использования биометрических данных работников, полученных работодателем в результате видеонаблюдения.

4. Взять обязательства о неразглашении персональных данных с ответственных лиц.

5. Установить информационные знаки о наличии видеокamеры. Они должны быть установлены на видных местах, где их легко увидеть и прочесть, в противном случае, при возникновении спорных моментов съемка может быть признана скрытой.

Элементы видеонаблюдения								
цели видеонаблюдения	информация об используемых приборах	порядок использования и передачи изображений	порядок и сроки хранения полученных изображений	перечень ответственных лиц, имеющих доступ к системе видеонаблюдения	меры защиты изображения от неправомерного использования и утраты	цели, категории, способы, сроки обработки и хранения персональных данных работников	порядок реагирования на обращения работников по поводу видеонаблюдения	порядок размещения камер и информационных табличек в местах видеосъемки

Рисунок 4 – Элементы видеонаблюдения в ПВТР или Положении о видеонаблюдении

Если камеры будут установлены без согласия сотрудника, а порядок обработки персональных данных будет работодателем нарушен, работодатель понесет ответственность в соответствии с действующим законодательством [30].

Еще одним важным аспектом компьютерного зрения являются вопросы ответственности за его ошибки. На сегодняшний день процент распознавания изображений достаточно высок и составляет от 96 до 98% [32], что позволяет специалистам сделать вывод о том, что данная технология достаточно эффективна, однако факт погрешности все-таки существует. Кроме того, не исключены ошибки компьютерного зрения в результате разного рода сбоев. Специалисты отмечают, что точность таких систем зависит от таких факторов как освещение, вернее уровня освещенности, угла проведения съемки, различных головных уборов и других деталей, и обстоятельств. Даже при оптимальных условиях распознавания существует вероятность возникновения ошибки. Специалистами выделяется риск компрометации биометрических данных киберпреступниками. Это связано с их уникальностью и тем, что их невозможно поменять, как например пароль или отозвать, как электронную подпись. В условиях производственного процесса этот риск не очень велик, но данные сотрудников должны быть также надежно защищены. Поэтому для минимизации возможных утечек для идентификации рекомендуется использовать государственные порталы или

официальные приложения от популярных вендоров.

Невозможно не отметить и тот факт, что любые нововведения встречают некоторое сопротивление сотрудников, выражающееся в нежелании осваивать новые технологии. Работодатели сталкиваются с тем, что по итогам аналитики данных с видеокamер работник может быть наказан или даже уволен. Необходимо отметить и тот факт, что не на всех предприятиях есть структурные подразделения по ИТ-технологиям, готовые выступать так называемыми драйверами таких технологических изменений.

Все понимают, что процессы планирования, внедрения и эксплуатации любых цифровых технологий требует значительных затрат, что «тормозит» их повсеместное использование в некоторых производственных областях. При этом работа с такими технологиями на предприятии требует от работодателя четкого понимания конечного результата и ожидаемого эффекта, так как неправильно сформулированное техническое задание может не привести к планируемым результатам и не достичь поставленной цели. В связи с этим примерный алгоритм проекта по разработке и внедрению системы компьютерного зрения на производстве может выглядеть примерно так, как он изображен на рисунке 5.

Обобщая все вышеизложенное, можно сказать о том, что процессы разработки внедрения и использования компьютерного зрения можно представить в виде рисунка 6.



Рисунок 5 – Разработка и внедрение системы компьютерного зрения на производстве

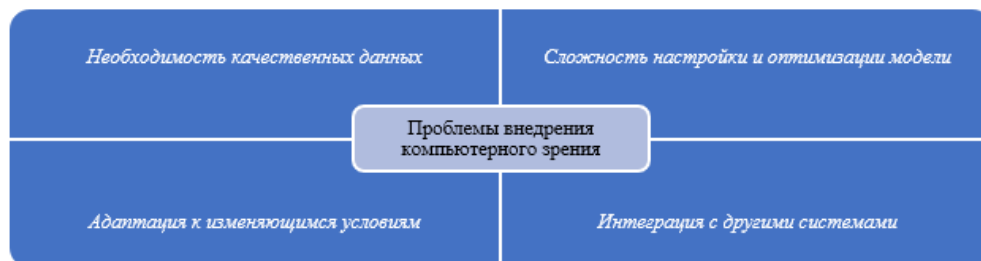


Рисунок 6 – Вызовы и проблемы компьютерного зрения на производстве

Выводы. Не смотря на все сложности, которые сегодня встречает технология компьютерного зрения при ее внедрении на производстве его дальнейшее развитие как технологии не вызывает вопросов у специалистов. Различные детали по ношению сотрудниками тех же средств индивидуальной защиты или работа без напарника вблизи опасных объектов может быть не замечена сотрудниками предприятия, отвечающими за безопасность в силу разных причин и обстоятельств, а дистанционные системы контроля устраняют так называемый «человеческий фактор», обрабатывая колоссальное количество операций в секунду. Но при этом такие технологии требуют продуктового подхода и серийности, что позволило бы снизить стоимость единичных или уникальных внедрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ibrahim Yousif, Jad Samaha, JuHyeong Ryu, Ramy Hari-k, Safety 4.0: Harnessing computer vision for advanced industrial protection, Manufacturing Letters, Volume 41, Supplement, 2024, Pages 1342-1356, ISSN 2213-8463, <https://doi.org/10.1016/j.mf-glet.2024.09.161>.
2. Dušan Tatić, Bojan Tešić, The application of augmented reality technologies for the improvement of occupational safety in an industrial environment, Computers in Industry, Volume 85, 2017, Pages 1-10, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.11.004>.
3. Hao Wu, Jinsong Zhao, An intelligent vision-based approach for helmet identification for work safety, Computers in Industry, Volume 100, 2018, Pages 267-277, ISSN 0166-3615, <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.037>.
4. Tomasz Jurtsch, Jan Moryson, Grzegorz Wiczyński, Machine vision-based detection of forbidden elements in the high-speed automatic scrap sorting line, Waste Management, Volume 189, 2024, Pages 243-253, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.08.015>.
5. Ankit Kumar, S.P. Harsha, A systematic literature review of defect detection in railways using machine vision-based inspection methods, International Journal of Transportation Science and Technology, 2024, ISSN 2046-0430, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.06.006>.
6. Flávio Gabriel Oliveira Barbosa, Gustavo L. Mourao, Jhon J. Majin Erazo, Guilherme Montemor Ghedini, José Alfredo Valverde, Dynamic risk management in office workspaces: Real-time analysis of staircase safety using computer vision and AI, Computers and Electrical Engineering, Volume 122, 2025, 109902, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109902>.
7. M. Di Capua, A. Ciaramella, A. De Prisco, Machine Learning and Computer Vision for the automation of processes in advanced logistics: the Integrated Logistic Platform (ILP) 4.0, Procedia Computer Science, Volume 217, 2023, Pages 326-338, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.228>.
8. B. Fabiano, F. Currò, From a survey on accidents in the downstream oil industry to the development of a detailed near-miss reporting system, Process Safety and Environmental Protection, Volume 90, Issue 5, 2012, Pages 357-367, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.06.005>.
9. JoonOh Seo, SangUk Han, SangHyun Lee, Hyoungkwan Kim, Computer vision techniques for construction safety and health monitoring, Advanced Engineering Informatics, Volume 29, Issue 2, 2015, Pages 239-251, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.02.001>.
10. Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации».
11. Федеральный закон от 24 апреля 2020 года №123 «О проведении эксперимента по установлению специального регулирования в целях создания необходимых условий для разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в субъекте Российской Федерации – городе федерального значения Москве и внесении изменений в статьи 6 и 10 Федерального закона «О персональных данных».
12. ГОСТ Р 59277-2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта – М.: Стандартинформ, 2020, 16 с.
13. Могилин К.А., Селищев В.А. Интеллектуальные системы видеонаблюдения в комплексах безопасности. Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 3. – С. 89-94.
14. ГОСТ Р 70652-2023 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Системы технического зрения. Общие требования – М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2023, 12 с.
15. ГОСТ Р 59385-2021 Информационные технологии (ИТ). Искусственный интеллект. Ситуационная видеоаналитика. Термины и определения – М.: Стандартинформ, 2021, 16 с.
16. ГОСТ Р 59895-2021 Технологии искусственного интеллекта в образовании. Общие положения и терминология – М.: ФГБУ «РСТ», 2021, 12 с.
17. Нейронные сети: [арх. 25 октября 2022] / Галушкин А.И. // Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю.С. Осипов. – М.: Большая российская энциклопедия, 2004-2017.
18. ГОСТ Р 71476-2024 Искусственный интеллект. Концепции и терминология искусственного интеллекта – М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2024. – 62 с.
19. ГОСТ Р 59898-2021 Оценка качества систем искусственного интеллекта. Общие положения – М.: ФГБУ «РСТ», 2021, 24 с.
20. Цыганова К., Скопина В. Компьютерное зрение: что это, где применяется – задачи и технологии компьютерного зрения. – URL: <https://practicum.yandex.ru/blog/chto-takoe-kompyuternoe-zrenie/> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

21. Семенова А. Всевидящее око. Зачем предприятию машинное зрение? – URL: <https://indpages.ru/dgtl-ctrl/vsevidyashhee-okozachem-predpriyatiyu-mashinnoe-zrenie/> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

22. Как применять компьютерное зрение на производстве? – URL: <https://kvantron.com/kak-primenyat-kompyuternoe-zrenie-na-proizvodstve/> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

23. Контроль применения средств индивидуальной защиты. – URL: https://www.vostok.spb.ru/services/videoanalitika/kontrol_primeneniya_siz.php (дата обращения 09.01.2025). – Текст: электронный.

24. Котов В. Искусственный интеллект (ИИ) в охране труда и промышленной безопасности. Успешные кейсы в России. – URL: <https://сферанефтегаз.рф/asiz-2023-5> (дата обращения 09.01.2025). – Текст: электронный.

25. «Северсталь» увеличила производительность стана 2000 с помощью машинного обучения. – URL: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/226056/2023-05-12/2023-w19/severstal-uvlechila-proizvoditelnost-stana-2000-pomoschu-mashinnogo-obucheniya> (дата обращения 09.01.2025). – Текст: электронный.

26. Использование машинного зрения для контроля за соблюдением правил промышленной безопасности на Кольской АЭС – URL: <https://dtc.techart.ru/storage/datatypes/dtc.cases/0001/00001593/files/keis-rosatom-kontrol-siz-na-aes.pdf> (дата обращения 17.01.2024). – Текст: электронный.

27. «Крок» представила отечественную систему дистанционного контроля промышленной безопасности. – URL: <https://www.cnews.ru/news/line/2022-12-01/krok-predstavila-otechestvennuyu> (дата обращения 09.01.2025). – Текст: электронный.

28. Ростех начал оценивать качество деталей авиадвигателей с применением нейросетей. – URL: <https://www.vniiftri.ru/press/novosti-otrasli/rostezh-nachal-otsenivat-kachestvo-detaley-aviadvigatelay-s-primeneniem-neyrosetey/> (дата обращения 09.01.2025). – Текст: электронный.

29. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 года №197 (ред. от 30.01.2024). – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/?ysclid=m5w7ahziz5219934714 (дата обращения 09.01.2025).

30. Как законно оформить видеонаблюдение на рабочем месте по ТК РФ. – URL: <https://www.kdelo.ru/art/385773-videonablyudenie-na-rabochem-meste-20-m3> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

31. Федеральный закон от 27 июля 2006 года №152 «О персональных данных» ст. 18.1 Закона о персональных данных.

32. Системы распознавания лиц могут допускать ошибки, приводящие к ложным обвинениям невиновных людей. – URL: <https://iz.ru/1641514/dmitrii-bulgakov/vse-kak-odin-k-chemu-privodiat-oshibki-sistem-raspoznavaniia-litc> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

33. Зуйкова А. Что такое компьютерное зрение и где его применяют. – URL: https://trends.rbc.ru/trends/industry/5f1f007e9a794756fafbfa83?from=copyhttps://trends.rbc.ru/trends/industry/5f1f007e9a794756fafbfa83?from=copy#card_5f1f007e9a794756fafbfa83_1 (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

34. Компьютерное зрение в промышленности. Лекция в Яндексе. – URL: <https://habr.com/ru/companies/yandex/articles/422087/> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

35. Машинное зрение на производстве. – URL: <https://cvc.ai/mashinnoe-zrenie-na-proizvodstve> (дата обращения 27.12.2024). – Текст: электронный.

36. Haitao Wu, Botao Zhong, Heng Li, Peter Love, Xing Pan, Neng Zhao, Combining computer vision with semantic reasoning for on-site safety management in construction, Journal of Building Engineering, Volume 42, 2021, 103036, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103036>.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 620.197:622.276.05

EDN: VZZBVZ

УЗЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ ДЛЯ ВНУТРИТРУБНОЙ ДИАГНОСТИКИ

© Автор(ы) 2025

SPIN: 6169-8590

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)***ТРАЗАНОВ Александр Викторович**, начальник участка*ООО «Новоуренгойский газохимический комплекс»**(Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Новый Уренгой, ул. Южная, 2А, e-mail: Alex05TN588@yandex.ru)*

Аннотация. Для обеспечения экологической безопасности различных производств, являющихся источниками техногенных чрезвычайных ситуаций, необходимы разработка и совершенствование методов и средств за состоянием оборудования, подвергающегося коррозионно-эрозионному износу. К числу таких производств относятся различные объекты нефтегазодобывающей отрасли в случае нарушения целостности или герметичности промысловых и магистральных трубопроводов. Основными причинами разрушения трубопроводов в отрасли является коррозия, вследствие того, что в составе добываемых сред находится растворенные оксид углерода, сероводород, кислород, различные механические примеси и др., которые в условиях обводненности потока приводят к интенсивной общей и локальной коррозии насосно-компрессорных труб, обсадных колонн и другого внутрискважинного оборудования. В связи с этим, для повышения экологической безопасности и предотвращения аварий, неконтролируемых выбросов и сбросов углеводородов в окружающую среду, необходима разработка эффективных средств контроля за коррозионным состоянием трубопроводов и оборудования. В работе проведен анализ и сравнение скорости коррозии на различных участках трубопровода (тройники, обтюраторы и др.), и предложена схема установки узла измерения скорости коррозии для тупиковых и проточных зон на горизонтальных и вертикальных участках промысловых трубопроводов, позволяющая проводить монтаж/демонтаж образцов-свидетелей без останова трубопровода. Получаемые с помощью предложенного технического решения сведения по скорости коррозии, позволят более достоверно рассчитывать объем противокоррозионной защиты и технического обслуживания трубопровода. Это позволит предотвращать техногенные чрезвычайные ситуации, связанные с нарушением целостности промысловых и магистральных трубопроводов и повысить экологическую безопасность отрасли.

Ключевые слова: экологическая безопасность, средства контроля, коррозионно-эрозионное изнашивание, локальная коррозия, трубопровод, узел измерения скорости коррозии.

CORROSION RATE MEASUREMENT UNIT FOR IN-PIPE DIAGNOSTICS

© 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)***TRAZANOV Aleksandr Viktorovich**, head of Section*ООО Novourenгой Gas Chemical Complex**(Russia, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Novy Urengoy, Yuzhnaya St., 2A, e-mail: Alex05TN588@yandex.ru)*

Abstract. To ensure environmental safety of various industries that are sources of manufactured emergencies, it is necessary to develop and improve methods and means for monitoring the condition of equipment subject to corrosion and erosion wear. Such industries include various oil and gas production facilities in the event of a breach of integrity or tightness of field and main pipelines. The main causes of pipeline destruction in the industry are corrosion, due to the fact that the extracted media contain dissolved carbon monoxide, hydrogen sulfide, oxygen, various mechanical impurities, etc., which, under conditions of water-cut flow, lead to intense general and local corrosion of tubing, casing strings and other downhole equipment. In this regard, to improve environmental safety and prevent accidents, uncontrolled emissions and discharges of hydrocarbons into the environment, it is necessary to develop effective means of monitoring the corrosion condition of pipelines and equipment. The paper analyzes and compares the corrosion rate in various sections of the pipeline (tees, obturators, etc.), and proposes a scheme for measuring the corrosion rate for dead-end and flow zones in horizontal and vertical sections of industrial pipelines, allowing for the installation/dismantling of test samples without stopping the pipeline. The information on the corrosion rate obtained using the proposed technical solution

will allow for more reliable calculation of the volume of anti-corrosion protection and pipeline maintenance. This will prevent manufactured emergencies associated with the violation of the integrity of industrial and main pipelines and improve the environmental safety of the industry.

Keywords: environmental safety, control means, corrosion-erosion wear, local corrosion, pipeline, corrosion rate measurement unit.

Для цитирования: Таранцева К.Р. Узел измерения скорости коррозии для внутритрубной диагностики / К.Р. Таранцева, А.В. Тразанов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 219-225. – EDN: VZZBVZ.

Введение. Разработка и совершенствование методов и средств для снижения негативного воздействия деятельности человека на окружающую среду является одним из основных условий обеспечения экологической безопасности, поскольку большинство производств продолжает оставаться источниками техногенных чрезвычайных ситуаций в результате которых происходит выбросы и сбросы различных загрязняющих веществ. К числу таких производств относятся различные объекты нефтегазодобывающей отрасли в случае нарушения целостности или герметичности промысловых и магистральных трубопроводов. Одной из основных причин разрушения трубопроводов в отрасли является коррозия, вследствие того, что в составе добываемых сред находится растворенные оксид углерода, сероводород, кислород, различные механические примеси и др., которые в условиях обводненности потока приводят к интенсивной общей и электрохимической коррозии в виде язв, питтингов и свищей. Кроме того, разработка глубокозалегающих газонефтяных месторождений осложнена высокими температурами пластов и давлениями, интенсифицирующими процесс коррозии. [1]. Скорость коррозии трубопроводов и оборудования в этих условиях может достигать 8 мм/год [2]. Наибольшему коррозионному разрушению подвержены промысловые трубопроводы, перекачивающие неочищенную обводненную продукцию, что приводит к большим экономическим затратам [3].

Исследования показывают, что общие расходы на коррозию составляют до 33% общего объема эксплуатационных расходов месторождения [4]. По мере выработки скважины характеристики добываемого сырья со временем меняются поэтому необходим постоянный мониторинг коррозионного состояния промысловых трубопроводов нефти и газа [5]. Данная проблема актуальна для нефтегазовых месторождений не только нашей страны, но и за рубежом [6, 7]. В результате коррозии происходит нарушение герметичности насосно-компрессорных труб, обсадных колонн и выход из строя дорогостоящего внутрискважинного оборудования и приборов, что приводит к необходимости замены и ремонта оборудования, простоям и потерям углеводородов [8].

В связи с этим, для повышения экологической безопасности и предотвращения аварий, неконтролируемых выбросов и сбросов углеводородов

в окружающую среду, необходима разработка эффективных методов и средств контроля за коррозионным состоянием промысловых и магистральных нефтегазопроводов.

Целью данной работы является разработка эффективных средств контроля за коррозионным состоянием промысловых и магистральных нефтегазопроводов, позволяющих определить скорости коррозии на различных участках трубопроводов.

Исследования показывают, что наибольшим коррозионным повреждениям в промысловых трубопроводах подвергаются застойные зоны и участки разветвлений, где меняется направление потока. Высокие скорости потоков значительно ускоряют скорость коррозии трубопровода как по причине ускоренного массопереноса, так и эрозионного удаления защитных слоев и пленок с их поверхности [9-11]. Поэтому при проведении коррозионного мониторинга необходим учет структуры потока и режима течения рабочей среды [12, 13].

Повышенные скорости коррозии наблюдаются в зоне перехода между пробковым и кольцевым режимами течения рабочей среды [14]. Установлено, что наибольшее коррозионно-эрозионное разрушение наблюдается в фиттингах, коленах, тройниках и других ответвлениях потока, тогда как на прямолинейных участках трубопроводов оно незначительно [15-17]. Это объясняется инерционным воздействием жидкости на стенку трубопровода в местах его изгибов. Образующиеся при этом локальные коррозионные повреждения в виде питтингов не пассивируются, так как образующаяся пленка карбоната железа выполняет роль катода, имеющего большую площадь на поверхности трубопровода, тогда как основания питтингов, являются анодами, занимающими крайне малую площадь, что и приводит к большой скорости их роста [18]. Удаление пленки продуктов коррозии с поверхности трубопроводов за счет высоких скоростей потока, вибрации, эрозии и др. приводят к ускоренной скорости коррозии, поскольку данная пленка не является защитной. Установлено, что участки трубопровода с осадками, обогащенными карбонатом кальция, не подвергаются коррозии, и являются катодными зонами, тогда как участки трубопровода с осадками карбоната железа и гидроксидов железа являются анодными зонами и активно корродируют с образованием язв и питтингов. [19-21]. Поэтому в процессе мониторинга необходимо измерять скорость коррозии на

различных участках трубопровода [22, 23].

Температура, минерализация, наличие воды в потоке, низкие значения водородного показателя и другие факторы дополнительно увеличивают скорость коррозии трубопроводов [24, 25] и приводят к их разрушению.

Для анализа коррозионного состояния трубопроводов в отрасли в настоящее время используются прямые и косвенные методы коррозионного мониторинга [26].

К прямым методам коррозионного мониторинга относятся размещение и выдержка образцов-свидетелей внутри трубопроводов с последующим определением скорости коррозии, лабораторные испытания в условиях приближенных к промышленным, внутритрубная диагностика, ультразвуковая толщинометрия, радиографический контроль и др.

К косвенным методам коррозионного мониторинга относятся различные способы прогнозирования на основе информации о концентрации агрессивных компонентов, величине водородного показателя (pH), температуры, скорости, содержания ингибитора и др.

В связи со сложным механизмом коррозии промышленных трубопроводов и влиянием на него большого количества факторов, наиболее достоверную информацию о коррозионном состоянии трубопровода можно получить только при помощи образцов-свидетелей и результатов внутритрубной диагностики. При этом важно определить корректное место установки образцов свидетелей, для того чтобы гидродинамическим условия их обтекания соответствовали таковым на различных участках трубопровода. Кроме того, установка и контроль состояния образцов свидетелей, должны осуществляться таким образом, чтобы не нарушать ход технологического процесса, т.е. без остановки работы трубопровода.

С учетом имеющихся теоретических и практических данных в исследуемой области, для выполнения поставленной цели решено было исследовать, как изменяется скорость коррозии на различных участках трубопроводов и разработать схему установки узла измерения скорости коррозии для внутритрубной диагностики при монито-

ринге коррозионного состояния промышленных и магистральных трубопроводов.

Методология. Определение скорости коррозии проводилось гравиметрическим методом на основе натурных испытаний с помощью образцов-свидетелей. Для исследования влияния режимов перекачивания скважинной продукции (температуры, давления, расхода) на скорость внутритрубной коррозии и погрешность ее измерения были проанализированы результаты внутритрубной диагностики технического состояния обвязки устьев газоконденсатных скважин 11 кустов Ачимовских отложений Уренгойского НГКМ. Куст скважин – это совокупность скважин, устья которых группируются на близком расстоянии друг от друга на общей площадке. В качестве допущения была принята гипотеза о едином химическом составе скважинной продукции данных кустов, так как они находятся на одном горизонте Ачимовских отложений, и равных внешних (температура, интенсивность охлаждения и т.д.) и внутренних (давление, обводненность и т.д.) параметров.

Были проанализированы скорости коррозии различных участков промышленного трубопровода: начальные участки трубы от скважины (обтюраторы), горизонтальные и вертикальные участки трубы, тройники.

Результаты. В настоящее время образцы свидетелей устанавливаются на линейных участках трубопроводов и на определенном расстоянии от устья скважины. По этой причине, вследствие существенной разницы температур и степени обводненности потока, имеется высокая погрешность измерений скорости коррозии на образцах-свидетелях и на промышленных трубопроводах и оборудовании. Поэтому крайне важен корректный выбор мест установки закрепления в трубопроводе узлов измерения скорости коррозии, с установленными в них образцами свидетелей.

Представленные ниже результаты наших исследований по влиянию температуры скважинной продукции на скорости коррозии вертикальных и горизонтальных участках трубопроводов (рис. 1 и 2) подтверждают данный вывод.

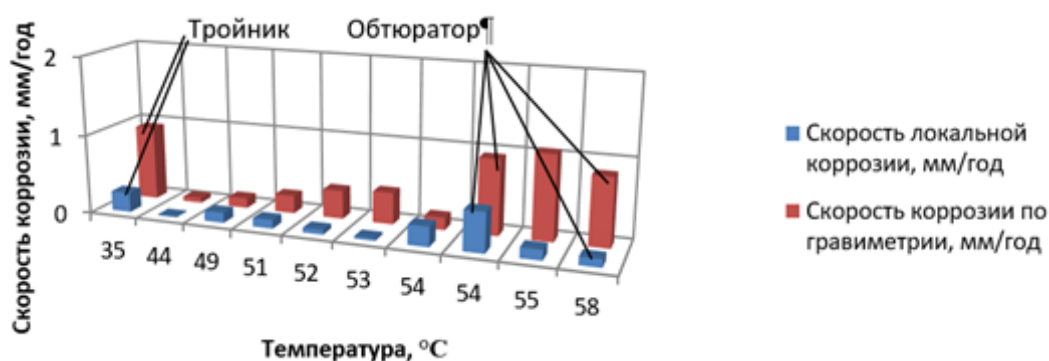


Рисунок 1 – Зависимость скорости коррозии от температуры скважинной продукции на вертикальном участке трубопровода

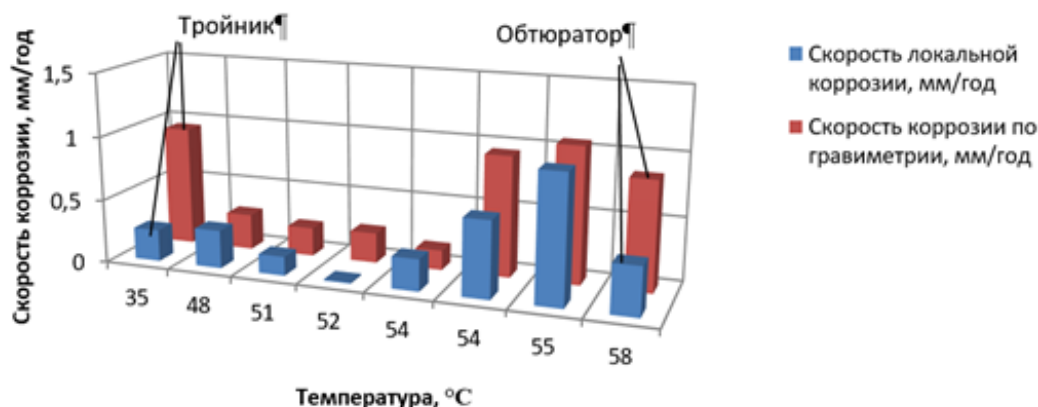


Рисунок 2 – Зависимость скорости коррозии от температуры скважинной продукции на горизонтальном участке трубопровода

Исследования показали, что скорость локальной коррозии трубопроводов возрастала с повышением температуры. При температурах скважинной продукции 50...55°C скорость коррозии составляла 0,6...1,25 мм/год, тогда как при температурах до 35...40°C скорость локальной коррозии была вдвое меньше и составляла 0,25...0,5 мм/год.

Наибольшему коррозионному разрушению подверглись обтюраторы, т.е. начальные участки трубы

от скважины, эксплуатирующиеся при высоких температурах скважинной продукции и тройники, устройства для разветвления рабочих потоков. Скорость коррозии обтюраторов и тройников достигала 1 мм в год. Данные выводы подтверждаются также результатами анализа характерных дефектов на вертикальных (табл. 1) и горизонтальных (табл. 2) участках трубопровода в зависимости от изменения температуры скважинной продукции.

Таблица 1 – Характерные дефекты вертикальных участков

№	T, °C	Характерный дефект	Продукты коррозии
1	58	Мелкие (до 1 мм) язвы, распределены равномерно по периметру. Есть ямки травления, проникающие под поверхность на 0,2 мм	Кристаллы $\text{FeCO}_3 + \text{FeO}$, Zn, Ca, Fe_3C
2	54	Крупные (более 2 мм) язвы по всему периметру. Глубокие (более 5 мм) канавки вдоль кольцевых швов.	Кристаллы FeCO_3 , SiO_2 , Fe_3C
3	53	Равномерно распределенные по периметру мелкие язвы 0,1-0,2 мм.	Fe_3O_4 , пористые продукты коррозии, кристаллов нет, $\text{Fe} + \text{O}$
4	52	Равномерная коррозия, бороздки, продольные и диагональные, более 0,5 мм	Тонкий (до 50 мкм) слой продуктов коррозии, $\text{Fe} + \text{O}$
5	51	Равномерная коррозия, диагональные бороздки глубиной более 1 мм	$\text{Fe} + \text{O}$
6	49	Равномерно распределенные по периметру язвы и бороздки. Видны бороздки, направленные по диагонали. Подповерхностная коррозия, диаметр 0,2 мм, глубина бороздок 1 мм	Пористые продукты коррозии, кристаллов нет, $\text{Fe} + \text{O}$, Fe_3C
7	44	Равномерная коррозия, мелкие неглубокие язвы до 0,1 мм	Тонкий (50 мкм) $\text{FeCO}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SiO}_2$, S

Таблица 2 – Характерные дефекты горизонтальных участков

№	T, °C	Характерный дефект	Продукты коррозии
	58	Коррозионные поражения в виде канавки и язв по нижней образующей.	Плотные кристаллические продукты: FeCO_3 , Fe_3C , Zn, Ca,
	58	Коррозионные поражения в виде канавки и язв по нижней образующей.	Плотные кристаллические продукты: FeCO_3 , Zn, Ca
	55	Язвы, канавка вдоль нижней образующей, глубина 4 мм	Кристаллический FeCO_3 , Fe_3C , FeCO_3 , Zn
	54	Глубокие канавки (более 3 мм) по нижней образующей	Кристаллы FeCO_3 , Fe_3C . Ямки травления и подповерхностная коррозия. На близлежащих участках наблюдаются области с Fe_3C и кристаллы FeCO_3
	52	Слой отложений очень тонкий, хрупкий и легко отслаивается от металла, отдельные небольшие вздутия, неглубокие 50 мкм язвенные поражения округлой формы	$\text{Fe} + \text{O}$
	51	Язвы вдоль нижней образующей, остатки окарины, глубина язв более 1 мм	Кристаллические пористые FeCO_3 , Fe_3C , Fe_3O_4
	51	Отдельные язвы и язвы вдоль двух образующих, глубина более 1,5 мм	Тонкий (10 мкм) слой $\text{Fe} + \text{O}$
	48	Язвенная коррозия, по нижней образующей язва глубиной более 3 мм	Кристаллические FeCO_3 , Fe_3O_4 , Zn, Fe_3C

Из представленных в таблицах 1 и 2 данных видно, что коррозия вертикальных участков трубопроводов представлена равномерной коррозией, небольшими язвами и диагональными канавками вдоль кольцевых швов. Скорость коррозии на горизонтальных участках трубопроводов выше и представлена глубокими язвами и коррозионными поражениями в виде канавки по нижней образующей. Продукты коррозии представлены плотными и пористыми кристаллическими продуктами $FeCO_3$, Fe_3C и Ca .

В связи с этим крайне важна корректная установка узла измерения скорости коррозии с образцами свидетелями при проведении коррозионного мониторинга.

Для проведения измерений скорости коррозии методом образцов-свидетелей, обеспечения возможности ее измерения в тупиковой (застойной) и проточной зонах трубопровода, а также проведения монтажа/демонтажа образцов-свидетелей без останова трубопровода нами была разработана схема узла измерения скорости изнашивания (рис. 3).

Скважинная продукция от устья скважины, после прохождения участка подачи поверхностно-активных

веществ (ПАВ) или иных ингибиторов коррозии, поступает на тройник, где происходит разделение потоков: через КШ4 среда поступает в тупиковую зону, где смешивается с относительно остывшей средой в результате чего происходит фазовый переход; далее через КШ2 и КШ3 (проходной участок) и через блок измерений она поступает в трубопровод.

Расходные характеристики среды позволяет регулировать КШ2, однако данная регулировка ограничена расходными характеристиками каждой отдельной скважины, контроль по расходомеру блока измерений. Монтаж/демонтаж устройств для измерения скорости изнашивания происходит поочередно:

- для тупиковой зоны КШ4 и КШ5 положение «закрыто» (опорожнение и дегазация через КШ8 и КШ9), с последующей разборкой фланцевого соединения и демонтажем образцов-свидетелей;

- для проходной зоны КШ2 и КШ3 положение «закрыто», КШ4 и КШ5 положение «открыто» (опорожнение и дегазация через КШ6 и КШ7), с последующей разборкой фланцевого соединения и демонтажем образцов-свидетелей.

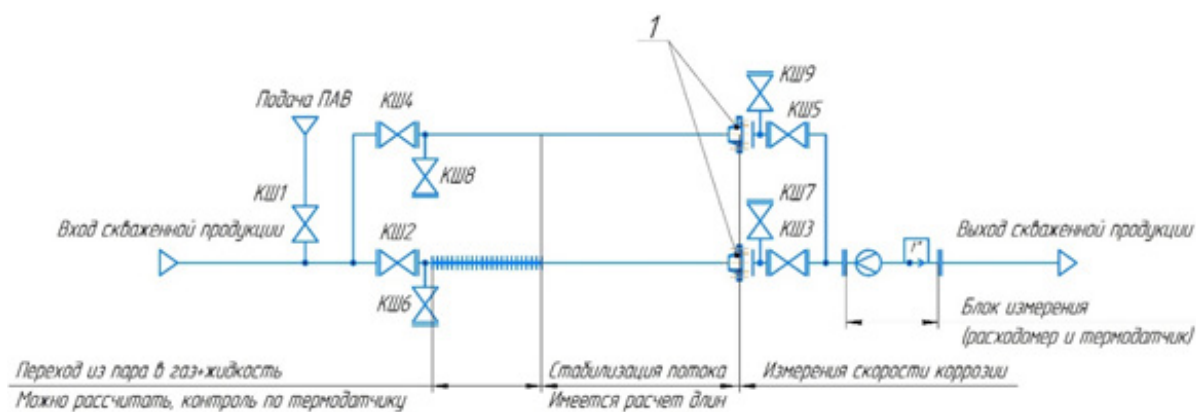


Рисунок 3 – Схема узла измерения скорости коррозии, с устройством (1) для измерения ее скорости

Обсуждение. Анализ полученных результатов показал следующее. Скорость коррозии на вертикальных участках трубопровода для всех исследованных элементов была меньше, чем на горизонтальных участках трубопровода. Это объясняется тем, что на вертикальных участках практически отсутствует пленка жидкости на поверхности труб, приводящая к ускорению коррозии. В тоже время, исследования показали, что независимо от расположения трубопровода горизонтальный или вертикальный наибольшему коррозионному разрушению подверглись обтюраторы и тройники. Это можно объяснить следующим образом.

Наибольшая скорость локальной коррозии наблюдалась в нижней части участков горизонтальных трубы, потому что там находилась жидкая фракция с большим содержанием воды (рис. 4). Анализ фазового состояния воды в углеродной смеси, показал, что зона фазового перехода воды, содержащейся в скважинной продукции, из парооб-

разного состояния (+108°C) в жидкое происходит у устья скважины, что и приводит к повышенному износу обвязок газоконденсатных скважин в процессе эксплуатации (рис. 5), что согласуется с результатами исследований авторов [27, 28].

При снижении температуры на вертикальных участках наблюдается снижение коррозионного повреждения стенок, а на горизонтальных — резкий рост в нижней образующей трубы (более 3 мм), там, где наблюдается фазовый переход (жидкость+газ) (рис. 5). Растворения в жидкой фазе серы и других примесей скважинной продукции приводит к еще большему увеличению ее коррозионной активности, а, следовательно, и к увеличению скорости коррозии трубопровода. С учетом того, что к 2030 году обводненность действующих скважин увеличится до 6,24...6,5 г/м³ флюида [27-29], можно предположить, что данная тенденция будет усиливаться. Дополнительно, в связи с фазовым переходом, в верхней образующей трубопровода может меняться преоб-

ладающий вид изнашивания, с чисто коррозионного на смешанный - эрозионно-коррозионный [30].

Уменьшение скорости коррозии при снижении температуры в зоне 51...54°C можно объяснить завершением процесса перехода воды в скважинной продукции из парообразного в жидкое состояние. Этим же можно объяснить дальнейшее уменьшение скорости коррозии на вертикальных участках и незначительный рост ее в нижней образующей трубы на горизонтальных участках. Появление глубоких канавок вдоль кольцевых швов связано, как с изменением направления потока в зоне неровностей,

вызванных сварным швом, так и с измененной структурой основного материала в зоне термического влияния.

Таким образом, результаты исследований показали, что температура и фазовое состояние воды в скважинной продукции влияет на скорость коррозии трубопроводов и на характер коррозионного изнашивания различных участков трубопровода. Жидкая фаза скапливается на тупиковых участках и застойных зонах, поэтому при определении скорости коррозии трубопровода необходимо учитывать, что эти зоны наиболее подвержены коррозионному разрушению.

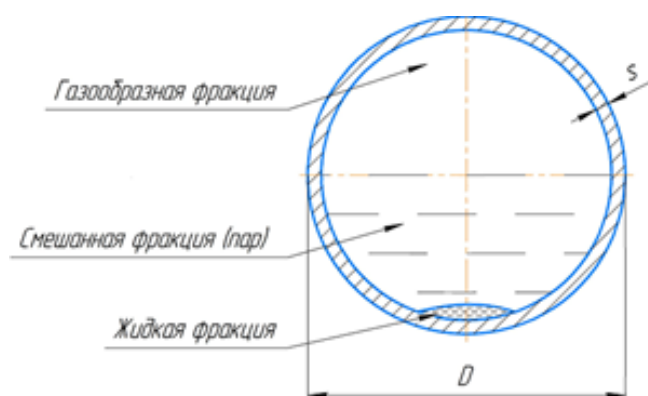


Рисунок 4 – Условное изображение агрегатного состояния скважинной продукции

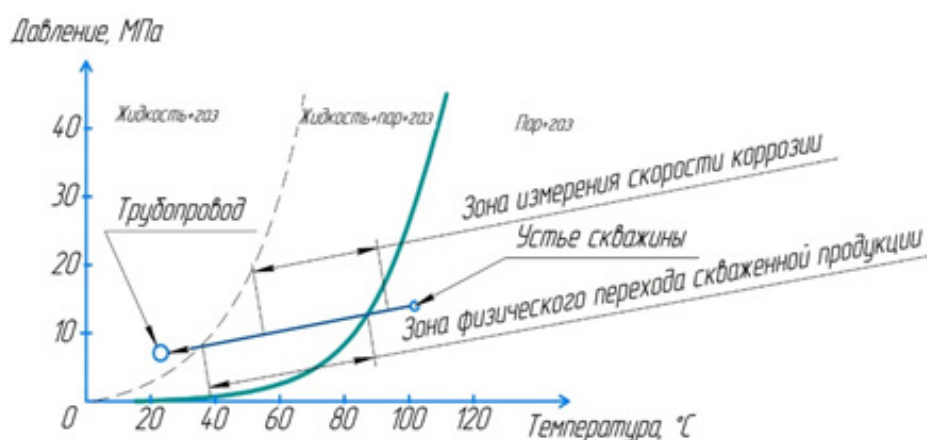


Рисунок 5 – Граница фазового состояния воды в углеводородной смеси

Выводы. Предложена схема установки узла измерения скорости коррозии на различных участках промысловых и магистральных нефтегазопроводов. Предложена конструкция узла измерения скорости коррозии для тупиковых и проточных зон, позволяющая проводить монтаж/демонтаж образцов-свидетелей без останова трубопровода. Получаемые с помощью предложенного технического решения сведения по скорости коррозии, позволяют более достоверно рассчитывать объем противокоррозионной защиты и технического обслуживания трубопровода. Это позволит предотвращать техногенные чрезвычайные ситуации, связанные с нарушением целостности промысловых и магистральных трубопроводов и повысить

экологическую безопасность отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Маркин, А.Н. CO₂-коррозия нефтепромыслового оборудования / А.Н. Маркин, Р.Э. Низамов. – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2003. – 187 с.
2. Легезин, Н.Е. Противокоррозионная защита систем добычи, сбора и транспорта природного газа с применением ингибиторов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.14 / Легезин Николай Егорович. – М., 1998. – 284 с.
3. Кантюков, Р.Р. Оценка опасности внутренней углекислотной коррозии промысловых трубопроводов на газовых и газоконденсатных месторождениях/ Р.Р. Кантюков, Д.Н. Запечалов, Р.К. Вагапов // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 2. – С. 56-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-2-56-62.
4. Silva, D. Corrosion in multiphase-flow pipelines: the impact on the oil and gas industry / Da Silva, A. Carlos. //Sao Paulo. – 2023. – 151 p.

5. Kermani, M.B. The Impact of Corrosion on Oil and Gas Industry / M. B. Kermani, D. Harrop // SPEProd. Facil. 1996. – P. 186-190. – DOI: 10.2118/29784-pa.
6. Вагапов, Р.К. Опыт защиты от внутренней коррозии объектов добычи газа в условиях воздействия коррозионно-агрессивных сред / Р.К. Вагапов // Инженерная практика. – 2017. – №10. – С. 36-40.
7. Кашковский, Р.В. Некоторые аспекты углекислотной коррозии стального оборудования и трубопроводов нефтегазовых промыслов / Р.В. Кашковский, К.А. Ибатуллин // Наука и техника в газовой промышленности. – 2016. – №3. – С. 71-91.
8. Маркин, А.Н. Коррозия и защита нефтепромыслового оборудования / А.Н. Маркин, В.Э. Ткачева, А.Ф. Дресвянников, А.Н. Ахметова – Казань: Изд-во КНИТУ, – 2022. – 188 с. ISBN 978-5-7882-3262-1.
9. Paolinelli, L.D. Calculation of mass transfer coefficients for corrosion prediction in two-phase gas-liquid pipe flow/ L.D. Paolinelli, S. Nesci // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – V. 165. – P.120689.
10. Nešić, S. Implementation of a Comprehensive Mechanistic Prediction Model of Mild Steel Corrosion in Multiphase Oil and Gas Pipelines / S. Nešić, A. Kahyarian, Y.S. Choi // Corrosion. – 2019. – V. 75. – P. 274-291. doi: 10.5006/3093.
11. Obaseki, M. Corrosion Rate Prediction in Oil and Gas Pipelines Based on Multiphase Flow Modelling/ M. Obaseki, P. Alfred, P. Tamaragaibi Elijah, S. Oseme Okuma // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2023. – V. 67(2). – P. 27-48.
12. Михайлов, В.Г. Совершенствование методов прогнозирования структуры газожидкостных потоков в горизонтальных трубопроводах / В.Г. Михайлов, М.Г. Волков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2024. – Вып. 5 (151). – С. 86-101. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2024-5-86-101>. EDN: BMYVFQ.
13. Ткачева, В.Э. Локальная CO₂-коррозия нефтепромыслового оборудования / В.Э. Ткачева, А.В. Бриков, Д.А. Лунин, А.Н. Маркин. – Уфа: Башнипнефть. – 2021. – 168 с.
14. Green, A.S. Flow-Related Corrosion in Large Diameter Multiphase Flowlines/ A.S. Green, B.V. Johnson, H. Choi // SPE-PP – 1993. – 97.
15. Zhang, J. Study on erosion wear of fracturing pipeline under the action of multiphase flow in oil and gas industry / J. Zhang, J. Kang, J. Fan, J. Gao // J. Nat. Gas Set. Eng. – 2016. – 32. – P. 334-346 doi: 10.1016/j.inase.2016.04.056.
16. Wang, H. Corrosion mechanism of low alloy steel in NaCl solution with CO₂ and H₂S / H. Wang, P. Zhou, S. Huang, C. Yu // Int. J. Electrochem. Sci. – 2016 – V. 11 – №. 2 – P. 1293- 1309.
17. Li, W. A direct measurement of wall shear stress in multiphase flow-Is it an important parameter in CO₂corrosion of carbon steel pipelines/ W. Li, B.F.M. Pots, B. Brown, K.E. Kac, S. Nesci //Corros. Sci. – 2016 – V.110. – №9. – P. 35-45 doi: 10.1016/j.corsci.2016.04.008.
18. Sanchez-Caldera, L.E. The Mechanism of Corrosion-Erosion in Steam Extraction Lines of Power Stations / Sanchez-Caldera, L.E., P. Griffith, E. Rabinowicz //Trans. ASME –1988 – Vol. 110. – P. 180-184.
19. Вагапов, Р.К. Исследование осадков при оценке причин коррозии на газовых объектах / Р.К. Вагапов, О.Г. Михалкина // <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-4-31-39>.
20. Вагапов, Р.К. Оценка коррозионной стойкости материалов в условиях конденсации влаги и наличия диоксида углерода / Р.К. Вагапов, Д.Н. Запечалов, К.А. Ибатуллин // Вопросы материаловедения. –2020. –1(101 – С. 163-175. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-101-1-163-175>.
21. Ткачева, В.Э. Локальная CO₂-коррозия нефтепромыслового оборудования / В.Э. Ткачева, А.Н. Маркин. – Уфа: РН-БашНИПИнефть. – 2022. – 296 с.
22. Videm, K. Corrosion of Carbon Steel in and Aqueous CO₂ Environment. Part 1: Solution Effects / K. Videm, A. Dugstad // Mat. Perf. – 1989 – 63.
23. Craig, B. Equation Clarifies Critical Velocity Calculation// Petroleum Engineering. – 1990. – P. 42.
24. Вагапов, Р.К. Анализ воздействия основных факторов эксплуатации на коррозионную ситуацию на объектах добычи газа в присутствии диоксида углерода/ Р.К. Вагапов, Д.Н. Запечалов, К.А. Ибатуллин// Наука и техника в газовой промышленности. – 2020. – № 3 (83). – С. 38-46.
25. Юсупов А.Д. Обеспечение устойчивых технологических режимов эксплуатации высокотемпературных газоконденсатных скважин в условиях углекислотной коррозии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа, 2022.
26. СТО Газпром 9.4-023-2013. Защита от коррозии. Мониторинг и прогноз коррозионного состояния объектов и оборудования. Система сбора, обработки и анализа данных. Основные требования. – М.: ОАО «Газпром», 2014. – 68 с.
27. Корякин, А.Ю. Оценка протекания углекислотной коррозии подземного оборудования ачимовских скважин Уренгойского НГКМ/ А.Ю. Корякин, В.Ф. Кобычев, И.В. Игнатов, И.В. Колинченко, У.Р. Хажирахметов, А.Д. Юсупов// Основные направления развития Уренгойского добывающего комплекса: сборник научно-технических статей. – Самара: Портал Инноваций, 2023. – С 230-240.
28. Корякин, А.Ю. Условия протекания углекислотной коррозии на объектах добычи ачимовских отложений, методы контроля и прогнозирования/ А.Ю. Корякин, В.Ф. Кобычев, И.В. Колинченко, А.Д. Юсупов// Перспективные направления развития Уренгойского комплекса: Сборник научных трудов/ ООО «Газпром добыча Уренгой». – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2018. – С 171-180.
29. Ярков, А.В. Изучение проблемы коррозии трубопроводов обвязки скважин сеноманской залежи Песцовой площадке Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения/ А.В. Ярков, Р.Р. Ялалетдинов, С.Н. Остроухов, А.Д. Юсупов, Д.Н. Запечалов, Р.К. Вагапов// Основные направления развития Уренгойского добывающего комплекса: сборник научно-технических статей. – Самара: Портал Инноваций, 2023. – С 299-310.
30. Тразанов, А.В. Определение зоны стабилизации потока в устройствах измерения скорости коррозии трубопроводов / А.В. Тразанов, К.Р. Таранцева // Нефтегазовое дело. – 2025. – Т. 23, № 1. – С. 91-102. ISSN 2073-0128 (print).

Статья поступила в редакцию 24.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 331.44:331.45:631

EDN: RAPAUZ

**СВЯЗЬ ПОДВИЖНОСТИ НЕРВНЫХ ПРОЦЕССОВ И УТОМЛЯЕМОСТИ ВО ВРЕМЯ УБОРКИ
УРОЖАЯ НА КОМБАЙНЕ «ЕНИСЕЙ КЗС 950»**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 8695-2067

AuthorID: 873808

ScopusID: 57208263583

ЛЫСЕНКО Сергей Григорьевич, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Охрана труда»

Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова

(347740, Россия, ЛНР, г. Луганск, улица Ленина, 21, e-mail: sergey.lysenko.1968@gmail.com)

SPIN: 1003-8910

AuthorID: 753858

ORCID: 0000-0003-0415-1925

ScopusID: 57208260649

ГАЙДА Анна Станиславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Охрана труда»

Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова

(347740, Россия, ЛНР, г. Луганск, улица Ленина, 21, e-mail: annah1823@gmail.com)

SPIN: 1176-1210

AuthorID: 368269

ORCID: 0000-0003-2526-9412

ScopusID: 57189602324

ЕГОРОВА Ирина Викторовна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Физическая культура, спорт и техносферная безопасность»

*Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного
аграрного университета в г. Зернограде*

(347740, Россия, Зерноград, улица Ленина, 21, e-mail: Orishenkoirina@mail.ru)

SPIN: 2169-9921

AuthorID: 1271326

ЩЕПКИН Александр Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Охрана труда»

Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова

(347740, Россия, ЛНР, г. Луганск, улица Ленина, 21, e-mail: lshcheprin@mail.ru)

Аннотация. Рассмотрены особенности психофизиологических параметров организма (работоспособность, внимание, утомляемость) студентов направления подготовки «Агроинженерия» Луганского Аграрного Университета имени К.Е. Ворошилова в период прохождения производственной практики во время уборки урожая на комбайне «ЕНИСЕЙ КЗС 950». Проводились исследования в условиях угасающего и дифференцированного торможения, исследована зависимость этих психофизиологических параметров от функциональной подвижности нервных процессов и сложных зрительно-моторных реакций выбора двух из трёх раздражителей. Установлена зависимость адаптивного уровня испытуемых с различной подвижностью нервной системы к выполнению умственной работы. Наблюдения показали, что испытуемые с подвижной нервной системой лучше адаптированы к выполнению сложных умственных задач. Предпринята попытка проанализировать работоспособность и внимание механизаторов в зависимости функциональной подвижности нервных процессов (параметры находились в прямой зависимости), при исследовании утомляемости наблюдалась обратная зависимость. Данные отличия были более выражены в условиях угасающего торможения. Исследуемые параметры в условиях дифференцированного торможения были ниже, чем в условиях угасающего торможения, таким образом, что с одной стороны ведет к снижению работоспособности, утомляемости и других параметров высшей нервной деятельности (например, внимания), с другой стороны способствует росту рисков при организации безопасных условий труда механизаторов. Проявление дифференцированного торможения наблюдалось в прямой зависимости от функциональной подвижности нервных процессов. Полученные результаты имеют практическую направленность. Во время организации полевых работ (при планировании повышения физической и интеллектуальной нагрузки: мероприятия с высокими рисками опасностей; при организации монотонных, однообразно-длительных видов работ; при формировании низового управленческого звена и т.д.) рекомендуется учитывать параметры подвижности нервных процессов механизаторов.

Ключевые слова: безопасные условия труда, нейродинамические параметры, функциональная подвижность нервных процессов, сложные зрительно-моторные реакции выбора двух из трёх раздражителей, работоспособность, внимание, угасающее торможение, дифференцированное торможение, механизатор.

**THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MOBILITY OF NERVOUS PROCESSES AND FATIGUE
DURING HARVESTING ON THE COMBINE "YENISEI KZS 950"**

© Author(s) 2025

LYSENKO Sergey Grigorievich, candidate of biological sciences,
associate professor Department of Occupational Safety
Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov
(291008, Russia, LPR, Lugansk, LNAU ter. 1, e-mail: sergey.lysenko.1968@gmail.com)

GAYDA Anna Stanislavovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Occupational Safety
Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov
(291008, Russia, LPR, Lugansk, LNAU area, 1, e-mail: annah1823@gmail.com)

EGOROVA Irina Viktorovna, candidate of technical sciences,
associate professor of the Department of Physical Culture, Sports and Technosphere Safety
Azov-Black Sea Engineering Institute - branch of the Don State Agrarian University in Zernograd
(347740, Russia, Zernograd, Lenina street, 21, e-mail: Orishenkoirina@mail.ru)

SHCHEPKIN Alexander Alekseevich, senior lecturer of the Department of Occupational Safety
Lugansk State Agrarian University named after K.E. Voroshilov
(291008, Russia, LPR, Lugansk, LNAU area, 1, e-mail: annah1823@gmail.com)

Abstract. The peculiarities of psychophysiological parameters of the organism (efficiency, attention, fatigue) of students of agroengineering of Lugansk Agrarian University named after K.E. Voroshilov during the period of industrial practice during harvesting on the combine harvester "ENISEY KZS 950" have been studied. We conducted studies in conditions of fading and differentiated inhibition, the dependence of these psychophysiological parameters on the functional mobility of nervous processes and complex visual-motor reactions of the choice of two of three stimuli was investigated. We established the dependence of the adaptive level of subjects with different mobility of the nervous system to the performance of mental work. It was observed that subjects with a mobile nervous system are better adapted to the performance of complex mental tasks. An attempt was made to analyze the working capacity and attention of mechanizers depending on the functional mobility of nervous processes (the parameters were in direct dependence), in the study of fatigue observed inverse dependence. These differences were more pronounced in conditions of fading inhibition. The investigated parameters in conditions of differentiated inhibition were lower than in conditions of fading inhibition, thus, that on the one hand leads to a decrease in working capacity, fatigability and other parameters of higher nervous activity (for example, attention), on the other hand contributes to the growth of risks in the organization of safe working conditions for mechanics. The manifestation of differentiated inhibition was observed in direct dependence on the functional mobility of nervous processes. The obtained results have practical orientation. During the organization of field work (when planning to increase the physical and intellectual load: activities with high risks of hazards; when organizing monotonous, monotonous-long types of work; when forming the lower management level, etc.) it is recommended to take into account the parameters of the mobility of nervous processes of mechanics.

Keywords: safe working conditions, neurodynamic parameters, functional mobility of nervous processes, complex visual-motor reactions of choosing two out of three stimuli, working capacity, attention, fading inhibition, differentiated inhibition, mechanizer.

Для цитирования: Лысенко С.Г. Связь подвижности нервных процессов и утомляемости во время уборки урожая на комбайне «Енисей КЗС 950» / С.Г. Лысенко, А.С. Гайда, И.В. Егорова, А.А. Щепкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 226-231. – EDN: RAPAUZ.

Введение. Анализ научных источников свидетельствует, что в следствии развития длительной адаптации формируется функциональная система оптимального энергообеспечения организма [1-4], особенностью которой является взаимодействие и корреляция различных слагаемых, физиологическое значение которых в полной мере не исследовано. Наиболее уязвимыми в процессе производственной адаптации оказываются функциональные системы, так как наблюдается не соответствие между адаптационными способностями организма и объемом систематических нагрузок [5-7]. Это касается, прежде всего, способности организма эффективно использовать свои биологические возможности при выполнении социальных и трудовых функций,

способности приспосабливаться к росту требований внешней среды, умения быстро и эффективно влиять на уровень своей деятельности.

Проблема влияния психофизиологических параметров высшей нервной деятельности (ВНД) на работоспособность у механизаторов является сегодня актуальной, потому что данные показатели напрямую связаны с эффективностью их труда и организацией продуктовой безопасности [8-10]. Нагрузки, достаточные для мобилизации психоэмоциональных, энергетических процессов и структурных изменений на клеточном и субклеточном уровнях есть тем пусковым механизмом формирования адаптации к работе. Одной из ключевых задач в изучении психофизиологических основ повышения

эффективности труда на сельскохозяйственных предприятиях является исследование взаимосвязи между генетическими механизмами адаптации и фенотипическими изменениями, формирующимися в результате морфофункциональных преобразований [11-13]. Решение этой задачи открывает пути для определения факторов, ограничивающих развитие функциональных систем организма и их активности, а также для разработки оптимальных режимов работы. Кроме того, это способствует изучению резервных возможностей организма, определению пределов допустимой компенсации и внедрению методов, направленных на укрепление здоровья, повышение работоспособности и трудовой эффективности механизаторов [14-18].

Важным показателем нервной системы является подвижность нервных процессов, параметр который характеризует насколько легко они сменяют друг друга.

Цель работы – исследовать зависимость работоспособности от подвижности нервных процессов и сложных зрительно моторных реакций у механизаторов.

Методология. Обследовали нейродинамические и психофизиологические параметры студентов Луганского государственного аграрного университета имени К.Е. Ворошилова (20 человек юношей в возрасте 20-21 года) в период прохождения производственной практики, во время уборки урожая на комбайне «ЕНИСЕЙ КЗС 950».

При помощи прибора ПНДО Хильченко в режиме «навязанного ритма» с использованием цветных раздражителей исследовали функциональную подвижность нервных процессов (ФПНП) и сложные зрительно моторные реакции выбора двух из трёх

раздражителей (ЛПРВ₂₋₃) [9, 19]. На основании полученных результатов испытуемых разделили на три группы с высоким, средним и низким уровнем ФПНП и ЛПРВ₂₋₃.

Определяли в группах функциональные возможности ВНД: на первом этапе – угасающее и на втором этапе – дифференцированное торможение (вызываемое с помощью метронома – 60 ударов в минуту), каждый этап состоял из двух частей, продолжительностью по 30 сек. Общая продолжительность 120 сек. [12, 20, 21].

Порядок исследований работоспособности проводился по схеме:

1) для тестирования показателей работоспособности использовались бланковые методики и корректурные знаковые таблицы В. Анфимова. Изменялись такие параметры, как количество обработанных знаков (КЗ), скорость выполнения задания (С) и точность выполнения (А);

2) внимание оценивалось по количеству ошибок: низкое внимание – более 3,0 ошибок; среднее внимание – от 1,0 до 2,99 ошибок; высокое внимание – от 0 до 0,99 ошибок.

Во время выполнения исследования обеспечивали условия, приближенные к естественным.

Результаты. Согласно результатам наших исследований, уровень функциональной подвижности нервных процессов у испытуемых варьировал в пределах 99,3-124,5 раздражителей в минуту, что соответствует норме [19].

Наблюдались также отличия по показателям ФПНП в группах: так 30% (6 чел.) имели высокий уровень подвижности нервных процессов, 50% (10 чел.) – средний уровень и 20% (4 чел.) – низкий (табл. 1).

Таблица 1 – Показатели функциональной подвижности нервных процессов и сложных зрительно моторных реакций выбора двух из трёх раздражителей в группах ($X \pm m$)

Показатели группы	высокая	средняя	низкая
ФПНП (n)	n=6	n=10	n=4
ФПНП р./мин	124,5 ± 5,26***	111,7 ± 4,13*	99,3 ± 6,18
ЛПРВ _{2-3,4} (n)	n=7	n=9	n=4
ЛПРВ _{2-3,4} мс.	403,2 ± 6,11***	428,6 ± 8,18*	443,7 ± 9,2

Примечания: n – количество обследуемых; р./мин – раздражителей в минуту; мс. – миллисекунда. *** – $p < 0,001$; * – $p < 0,05$.

Средние параметры работоспособности на 1 этапе исследования (угасающего торможения) у юношей были $129,4 \pm 7,13$ обработанных знаков, что соответствует высокому уровню. При этом в группах с высокой и средней ФПНП наблюдалась высокая умственная работоспособность – более 121 обработанных знаков, а в группах низкой подвижностью – хорошая умственная работоспособность – от 101 до 120 обработанных знаков. Выявили достоверную разницу по работоспособности между группами с высокой и низкой подвижностью (табл. 2).

Средние параметры внимания при исследовании угасающего торможения у испытуемых были $0,8 \pm$

$0,156$ ошибок, что соответствует высокому уровню. При этом в группах с высокой и средней ФПНП наблюдалось – высокое внимание – от 0 до 0,99 ошибок, а в группах с низкой подвижностью – средний уровень внимания – от 1,0 до 2,99 ошибок. Выявили достоверную разницу во внимании между высокой и средней группами относительно низкой (табл. 2).

Средняя скорость (С) выполнения задания 1 этапа исследования у юношей находилась в пределах $4,2 \pm 0,03$ зн./с., что соответствует высокому уровню. При этом, в группах с высокой, средней подвижностью наблюдалось – высокая скорость внимания – в диапазоне от 4,0-4,5 зн./с., а в группе с низкой –

средняя – 3,7 зн./с. Наблюдалась достоверная разница по скорости и вниманию между группой с высокой ФПНП и слабой.

Точность (А) выполнения задания в исследуемых группах наблюдалась выше нормы (табл. 2).

Средние параметры работоспособности на 2 этапе исследования (дифференцированное торможения) у юношей были $63,2 \pm 5,23$ обработанных знаков, что соответствует высокому уровню для данной части исследования. При этом в группах с высокой и средней подвижностью наблюдалась высокая умственная работоспособность – более 61 обработанных знаков, а в группах с низкой – хорошая умственная работоспособность – от 51 до 60 обработанных знаков. Выявили достоверную разницу по работоспособности между высокой и низкой ФПНП (табл. 3).

Средние параметры внимания при исследовании дифференцированного торможения у испытуемых были $1,8 \pm 0,64$ ошибок, что соответствует среднему уровню. Наблюдалась разница во внимании между высокой и средней группами относительно низкой (табл. 3), при этом степень достоверности была менее выражена по сравнению с 1 этапом эксперимента (при угасающем торможении).

Средняя скорость выполнения задания на втором этапе исследования во второй части у юношей составила $2,0 \pm 0,04$ знака в секунду. При этом в

группах с высокой функциональной подвижностью нервных процессов (ФПНП) была зафиксирована достоверная разница в скорости и точности выполнения задания по сравнению с группами с низкой подвижностью. Точность выполнения задания в группах во 2 части исследования оставалась выше нормы (табл. 3).

Показатели сложных зрительно-моторных реакций выбора двух из трёх раздражителей у испытуемых находились в пределах 403,2-443,7 миллисекунд, что соответствует норме [20]. Отмечены отличия по показателям ЛПРВ_{2,3} в группах: так 35% (7 чел.) имели высокий уровень сложных зрительно моторных реакций, 45% (9 чел.) – средний уровень и 20% (4 чел.) – низкий (табл. 1).

Достоверных отличий по показателям работоспособности и внимания на 1 и 2 этапах исследования между группами с различной функциональной подвижностью нервных процессов и группами с различными сложными зрительно моторными реакциями выбора двух из трёх раздражителей не наблюдалось. Отличия выявленные по признаку количественное наполнение групп ЛПРВ_{2,3} и ФПНП свидетельствует о возможном выявлении различий в работоспособности и внимании в случае увеличения выборки, что нуждается в дальнейших исследованиях (табл. 4).

Таблица 2 – Отличие между статистическими показателями внимания юношей 1 этап исследования – угасающее торможение в группах с разным уровнем функциональной подвижностью нервных процессов ($X \pm t$)

Психофизиологические показатели (ПФП)	ФПНП высокая n=6	ФПНП средняя n=10	ФПНП низкая n=4
КЗ	$146,2 \pm 4,21^{***}$	$129,4 \pm 7,13^*$	$112,4 \pm 5,1$
КО	$0,5 \pm 0,1^{***}$	$0,8 \pm 0,156^{**}$	$1,4 \pm 0,18$
С	$4,6 \pm 0,03^*$	$4,2 \pm 0,03$	$3,6 \pm 0,04$
А	$98,1 \pm 0,32^*$	$95,2 \pm 0,24$	$91,3 \pm 0,11$

Примечания: КЗ – количество знаков обработанных; КО – количество ошибок; С – скорость зн/с.; А – точность выполнения задания (%); n – количество обследуемых; *** – $p < 0,001$; * – $p < 0,05$.

Таблица 3 – Отличие между статистическими показателями внимания юношей 2 этап исследования – дифференцированное торможение в группах с разным уровнем функциональной подвижностью нервных процессов ($X \pm t$)

	ФПНП высокая n=6	ФПНП средняя n=10	ФПНП низкая n=4
КЗ	$70,0 \pm 4,6^{***}$	$63,2 \pm 5,23$	$55,8 \pm 5,62$
КО	$1,4 \pm 0,5^{**}$	$1,8 \pm 0,64^*$	$2,4 \pm 0,5$
С	$2,3 \pm 0,02^*$	$2,0 \pm 0,04$	$1,7 \pm 0,05$
А	$92,8 \pm 1,1^*$	$89,8 \pm 1,52$	$81,7 \pm 0,96$

Примечания: КЗ – количество знаков обработанных; КО – количество ошибок; С – скорость зн/с.; А – точность выполнения задания (%); n – количество обследуемых; *** – $p < 0,001$; * – $p < 0,05$.

Обсуждение. По результатам эксперимента наблюдались отличия работоспособности, объема внимания, скорости и точности выполнения задач между группами с высокой и низкой подвижностью нервной системы. Показатели работоспособности и внимания были больше в группах с высокой ФПНП, при исследовании утомляемости (по количеству ошибок) отмечена обратная зависимость – в группе с

низкой подвижностью были высшие показатели. Эти отличия были отчетливыми в условиях угасающего торможения, данный факт, свидетельствует о том, что показатели ВНД находятся в зависимости от функциональной подвижности нервных процессов.

Исследуемые параметры в условиях дифференцированного торможения были ниже, по сравнению с таковыми в условиях угасающего торможения.

Это, возможно, указывает на то, что в условиях формирования дифференцированного торможения под воздействием дополнительного раздражителя (близкого по параметрам к условному сигналу, но не

сопровождающегося подкреплением) возбуждаются дополнительные нервные центры, что влияет на время ответной реакции и снижает параметры внимания и работоспособности.

Таблица 4 – Отличие между статистическими показателями внимания юношей в группах с разной длительностью сложных зрительно моторных реакций выбора двух из трёх раздражителей ($X \pm t$)

	ЛПРВ _{2,3} . высокая n=7	ЛПРВ _{2,3} . средняя n=9	ЛПРВ _{2,3} . низкая n=4
1 этап исследования – угасающее торможение			
КЗ	141,8 ± 4,26***	127,0 ± 6,19*	112,4 ± 5,1
КО	0,5 ± 0,15***	0,9 ± 0,12**	1,4 ± 0,18
С	4,4 ± 0,04*	4,1 ± 0,03	3,6 ± 0,04
А	98,1 ± 0,2*	95,4 ± 0,18	91,3 ± 0,11
2 часть исследования – дифференцированное торможение			
КЗ	72,3 ± 6,6***	61,2 ± 5,33	55,8 ± 5,62
КО	1,4 ± 0,6**	1,9 ± 0,54*	2,4 ± 0,5
С	2,3 ± 0,02*	2,0 ± 0,04	1,7 ± 0,05
А	92,4 ± 1,15*	86,8 ± 1,57	81,7 ± 0,96

Примечания: КЗ – количество знаков обработанных; КО – количество ошибок; С – скорость зн/с.; А – точность выполнения задания (%); n – количество обследуемых; *** – $p < 0,001$; * – $p < 0,05$.

В ходе исследования установлен различный адаптивный уровень испытуемых к выполнению умственной работы, что позволяет нам предположить, что студенты с высокой функциональной подвижностью нервных процессов лучше адаптированы к выполнению сложных умственных задач.

Опираясь на результаты исследования, можно рекомендовать:

- при планировании повышения физической и интеллектуальной нагрузки работников (в период организации полевых работ) учитывать параметры их функциональной подвижности нервных процессов;
- так, как уровень внимания был выше в группах с высокой ФПНП, мероприятия с высокими рисками опасностей предусматривать для данной категории работников;
- при формировании низового управленческого звена во время выполнения полевых и подготовительных работ подбирать работников с более подвижной нервной системой в условиях исследования дифференцированного торможения (данная категория работников в условиях дополнительных раздражающих факторов, при необходимости оперативного принятия решений обладают более высоким уровнем параметров ВНД, устойчивостью к утомлению).

Помимо этого дальнейшего исследования требуют вопросы, посвященные исследованию характера изменений работоспособности и внимания в зависимости от интенсивности нагрузок (физических и умственных) в группах с различной подвижностью нервных процессов.

Выводы. Работоспособность и внимание были выше в группах с высокой ФПНП, при исследовании утомляемости наблюдалась обратная зависимость, что указывает на обратную зависимость рисков производственного травматизма механизаторов от

функциональной подвижности нервных процессов. Это, вероятно, свидетельствует о том, что показатели ВНД находятся в зависимости от функциональной подвижности нервных процессов. Данные отличия были более выражены в условиях угасающего торможения, это свидетельствует о том, что длительная монотонная работа (связанная с механизированной обработкой земли, уборкой урожая) влияет на уровень безопасности труда механизаторов в условиях повышения работоспособности и увеличения утомляемости, и имеет обратную зависимость от ФПНП.

Исследуемые параметры в условиях дифференцированного торможения были ниже, чем в условиях угасающего торможения, таким образом, творческая работа, связанная с использованием с различной интенсивностью разнообразных параметров нервной системы. Это с одной стороны ведет к снижению работоспособности, утомляемости и других параметров ВНД (например, внимания), с другой стороны способствует росту рисков при организации безопасных условий труда механизаторов. Проявление дифференцированного торможения находится в прямой зависимости от функциональной подвижности нервных процессов. У испытуемых механизаторов с высокой ФПНП наблюдали высшую степень адаптации к выполнению сложных умственных задач и нестандартных творческих заданий.

При организации полевых работ с высокими рисками опасностей, организации монотонных, однообразнодлительных видов работ (культивация, вспашка, покос, боронование и т.д.), планировании повышения интенсивности физической и интеллектуальной нагрузки, формировании низового управленческого звена во время выполнения полевых и подготовительных работ рекомендуется учитывать параметры функциональной подвижностью нервных

процессов механизаторов. Отличия выявленные по признаку количественное наполнение групп ЛПРВ²⁻³ и ФПНП свидетельствует о возможном выявлении различий в работоспособности и внимании в случае увеличения выборки, что нуждается в дальнейших исследованиях

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Impact of the Order of Movement on the Median Nerve Root Function: A Neurophysiological Study with Implications for Neu-rodynamic Exercise Sequencing. / Ibrahim D, Ahbouch A, Qadah RM, Kim M, Alrawaili SM, Moustafa IM.J Clin Med. 2024 Feb 5;13(3):913. doi: 10.3390/jcm13030913. PMID: 38337607 Free PMC article.
2. Comparative Effects of Neurodynamic Slider and Tensioner Mobilization Techniques on Sympathetic Nervous System Function: A Randomized Controlled Trial / Papacharalambous C, Savva C, Karagiannis C, Paraskevopoulos E, Pamboris GM.J Clin Med. 2024 Aug 28;13(17):5098. doi: 10.3390/jcm13175098. PMID: 39274312 Free PMC article.
3. Neurodynamic Treatment Promotes Mechanical Pain Modulation in Sensory Neurons and Nerve Regeneration in Rats. / Carta G, Fornasari BE, Fregnan F, Ronchi G, De Zanet S, Muratori L, Nato G, Fogli M, Gambarotta G, Geuna S, Raimondo S.Biomedicine. 2022 May 31;10(6):1296. doi: 10.3390/biomedicine10061296.PMID: 35740318 Free PMC article.
4. Поликанова И.С. Психофизиологические и молекулярно-генетические корреляты утомления / И.С. Поликанова, С.В. Леонов // Современная зарубежная психология. – 2016. – Т. 5, № 4. – С. 24-35. DOI: 10.17759/jmfp.2016050403. EDN: YJLDKR.
5. Шабанов Н.И., Липкович И.Э., Петренко Н.В., Пикалов А.В., Егорова И.В., Гайда А.С. Эргономика и психофизиологические основы безопасности труда в агроинженерной сфере: монография. Черноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2018. 262 с. <https://ачии.рф/files/e44ff30e-aeb7-45b2-9a41-80e6340c94b6.pdf> (дата обращения 17.07.2023).
6. Bochkovskiy A.P., Sapozhnikova N.Y. Development of system of automated occupational health and safety management in enterprises // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2021. – Vol. 107. – No 1. – P. 28-41. DOI: 10.5604/01.3001.0015.2454. EDN: VWLZGP.
7. Fundamentals of the organization of supervisory activities for labor safety during the repair of mobile power facilities in agriculture / I. Lipkovich, I. Egorova, N. Petrenko [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 471. – P. 04006. – DOI 10.1051/e3sconf/202447104006. – EDN VGGWND.
8. Greening of processes in soil cultivation / I. Lipkovich, I. Egorova, N. Petrenko [et al.] // Bio Web of Conferences: IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024), Tashkent, Uzbekistan, 28-30 марта 2024 года. Vol. 105. – Les Ulis: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. – P. 01001. – DOI 10.1051/bioconf/202410501001. – EDN FPPNNH.
9. Comparative Effects of Neurodynamic Slider and Tensioner Mobilization Techniques on Sympathetic Nervous System Function: A Randomized Controlled Trial / Papacharalambous C, Savva C, Karagiannis C, Paraskevopoulos E, Pamboris GM.J Clin Med. 2024 Aug 28;13(17):5098. doi: 10.3390/jcm13175098. PMID: 39274312 Free PMC article.
10. Ibrahim D, Ahbouch A, Qadah RM, Kim M, Alrawaili SM, Moustafa IM.J. Impact of the Order of Movement on the Median Nerve Root Function: A Neurophysiological Study with Implications for Neurodynamic Exercise Sequencing. // Clin Med. 2024 Feb 5;13(3):913. doi: 10.3390/jcm13030913. PMID: 38337607 Free PMC article.
11. Магамедминова, М.М. Признаки утомления и переутомления, их причины и профилактика / М.М. Магамедминова, В.М. Коротких, С.Р. Полякова, М.М. Осокина. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 8 (298). – С. 74-75. – URL: <https://moluch.ru/archive/298/67584/> (дата обращения: 23.09.2024).
12. Агаджанян, Н.А. Ваша работоспособность сегодня / Н.А. Агаджанян, М.М. Горшков, Л.А. Котельник, и др. – М.: Советская Россия, 2020. – 462 с.
13. Шестаков Ю.Г., Яковлева Е.В., Полежаева Е.В., Алибекова И.В. Новые подходы к совершенствованию системы охраны труда // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2013. – № 1(40). – С. 213-216. EDN: PWZONZ.
14. Alharmoodi BY, Arumugam A, Ahbouch A, Moustafa IM, Hong Kong Physiother J. Comparative effects of tensioning and sliding neural mobilization on peripheral and autonomic nervous system function: A randomized controlled trial / 2022 Jun;42(1):41-53. doi: 10.1142/S1013702522500056. Epub 2022 Mar 17. PMID: 35782695 Free PMC article.
15. Борисов К.С. Внимание и память: монография / Под ред. Н.Ф. Добрынина. М.: Прогресс, 2018. – 134 с.
16. Carta G, Fornasari BE, Fregnan F, Ronchi G, De Zanet S, Muratori L, Nato G, Fogli M, Gambarotta G, Geuna S, Raimondo S. Biomedicine. Neurodynamic Treatment Promotes Mechanical Pain Modulation in Sensory Neurons and Nerve Regeneration in Rats. / 2022 May 31;10(6):1296. doi: 10.3390/biomedicine10061296.PMID: 35740318 Free PMC article.
17. Антропова М.В. Работоспособность обучающихся и ее динамика в процессе умственной деятельности. М.: Педагогика, 2017. – 251 с.
18. Серебрякова, Н.Г. Эргономические подходы при проектировании безопасных условий труда операторов сельскохозяйственной техники / Н.Г. Серебрякова, Т.В. Молош, Е.И. Подашевская // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов. – Горки: БГСХА, 2022. – Вып. 7. – С. 51-55.
19. Эргономика и психофизиологические основы безопасности труда в агроинженерной сфере / Н.И. Шабанов, И.Э. Липкович, Н.В. Петренко [и др.]. – Черноград: Азово-Черноморский инженерный институт – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Донской государственный аграрный университет" в г. Чернограде, 2018. – 262 с. – ISBN 978-5-91833-188-0. – EDN SHSXBZ
20. Копаев, В. Здоровье и работоспособность человека / В. Копаев. – М.: Знание, 2019. – 270 с.
21. The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review / J. Van Cutsem, S. Marcora, K. De Pauw, S. Bai-ley, R. Meeusen, B. Roelands // Sports Medicine. – 2017. – Vol. 47, No. 8. – P. 1569-1588. DOI: 10.1007/s40279-016-0672-0. EDN: DUCPYG.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025

УДК 504.3.054

EDN: PALYQW

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЫЛЕЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ В ТОЧЕЧНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ**

© Автор(ы) 2025

SPIN: 9612-8379

AuthorID: 582408

ORCID: 0000-0001-7065-3726

ResearcherID: AAB-6899-2021

ScopusID: 57194619278

МАНЖИЛЕВСКАЯ Светлана Евгеньевна, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Организация строительства»

Донской государственный технический университет

(344001, Россия, Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, 1, e-mail: smanzhilevskaya@yandex.ru)

SPIN: 9887-0836

AuthorID: 148320

ORCID: 0000-0001-7948-3049

ResearcherID: N-2168-2018

ScopusID: 7004170297

АЗАРОВ Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве»

Волгоградский государственный технический университет

(400074, Россия, Волгоград, улица Академическая, 1, e-mail: azarovpubl@mail.ru)

Аннотация. Процесс планирования строительных работ по возведению или реконструкции объекта точечной застройки имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать. Среди них: ограниченное пространство; расположение в непосредственной близости от жилых и деловых районов города; стеснённые условия; учёт климатических и метеорологических факторов; экологические риски, связанные с образованием пылевых выбросов от строительных процессов. При разработке мероприятий по предотвращению распространения пылевых выбросов в проектах точечного строительства (возведение новых объектов и реконструкция существующих зданий) необходимо обеспечить безопасность строителей и инженерно-технических работников на строительной площадке, а также минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, включая загрязнение воздуха пылью от строительных работ на прилегающей территории. Для этого строительные площадки для таких объектов должны быть оснащены техническими решениями для защиты атмосферного воздуха и обеспечения экологической безопасности на территории проведения работ. Цель данного исследования – разработка компактного, универсального, эффективного с точки зрения пылеулавливания технического решения, позволяющего снизить пагубное воздействие пыли на воздушную среду городских территорий от источника выбросов – строительная площадка. В процессе работы сначала исследуется оптимальная конструктивная схема пылезащитных экранов, необходимых для предотвращения распространения пылевых выбросов за пределы строительной площадки. Затем проводятся натурные исследования эффективности разработанной конструкции пылезащитного экрана. Результаты исследований показывают высокую эффективность сдерживания распространения пылевых частиц. Монтаж пылезащитного экрана продемонстрировал высокую результативность пылеулавливания – более 90% пылевых частиц остались на территории строительного объекта и не распространились на территорию городской застройки. Дополнительно конструкция обрабатывается специально разработанным химическим раствором. Внедрение экономически обоснованных технических средств борьбы с загрязнением воздуха на строительных площадках позволит подрядчику экономить затраты на восстановление территории, что в дальнейшем приведёт к увеличению прибыли от производства работ.

Ключевые слова: пылезащитный экран, распространение пыли, экологическая безопасность городских территорий.

**THE USE OF DUST SCREENS IN POINT-BASED BUILDINGS TO IMPROVE
THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF URBAN AREAS**

© The Author(s) 2025

MANZHILEVSKAYA Svetlana Evgenievna, candidate of technical sciences,

associate professor of «Construction management»

Don State Technical University

(344001, Russia, Rostov-on-Don, sq. Gagarin 1, e-mail: smanzhilevskaya@yandex.ru)

AZAROV Valeriy Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor,

head of the Department «Life safety in construction and urban economy»

Volgograd State Technical University

(400074, Russia, Volgograd, street Akademicheskaya 1, e-mail: azarovpubl@mail.ru)

Abstract. The process of planning construction works for the construction or reconstruction of a point-based development object has a number of features that must be taken into account. Among them: limited space; location in close proximity from residential and business areas of the city; cramped conditions; consideration of climatic and meteorological factors; environmental risks associated with the formation of dust emissions from construction processes. When developing measures to prevent the spread of dust emissions in point construction projects (construction of new facilities and reconstruction of existing buildings), it is necessary to ensure the safety of construction workers and engineering workers on the construction site, as well as to minimize the negative impact on the environment, including air pollution from construction work in the surrounding area. To do this, construction sites for such objects must be equipped with technical solutions for protection air quality and ensuring environmental safety in the area of work. The purpose of this study is to develop a compact, universal, and dust-efficient technical solution that reduces the harmful impact of dust on the urban air environment from the source of emissions—a construction site. In the course of the work, the optimal design scheme of dust screens necessary to prevent the spread of dust emissions outside the construction site is first investigated. Then, full-scale studies of the effectiveness of the developed design of the dust screen are conducted. The research results show a high efficiency of controlling the spread of dust particles. The installation of a dust screen demonstrated high efficiency of dust collection – more than 90% of dust particles remained on the territory of the construction site and did not spread to the territory of urban development. Additionally, the structure is treated with a specially developed chemical solution. The introduction of cost-effective technical means to combat air pollution on construction sites will allow the contractor to save costs for the restoration of the territory, which will further lead to an increase in profits from the work.

Keywords: dust screen, dust distribution, environmental safety of urban areas.

Для цитирования: Манжилевская С.Е. Применение пылезащитных экранов в точечном строительстве для повышения экологической безопасности городских территорий / С.Е. Манжилевская, В.Н. Азаров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14. – № 1(69). – С. 232-237. – EDN: PALYQW.

Введение. В процессе строительства, эксплуатации и демонтажа зданий и сооружений необходимо соблюдать требования экологической безопасности, охраны труда и рационального использования ресурсов. Особое внимание следует уделять контролю за выбросами пыли, чтобы минимизировать негативное воздействие на здоровье человека [1-3].

Строительство, начиная с земляных работ и заканчивая уборкой территории, неизбежно связано с образованием пыли [4,5]. Различные действия на строительных площадках, такие как разработка грунта, благоустройство территории, штукатурные работы, погрузочно-разгрузочные работы, перемещение строительных материалов, смешивание смесей и каменная кладка, приводят к загрязнению воздуха частицами пыли в диапазоне от PM0.5 до PM10 [6,7]. Эти частицы пыли не только создают проблемы для работников на объектах, но и негативно влияют на жителей, чьи дома расположены вблизи строительных площадок [8].

В 2021 году группа ученых из Шри Ланка доказали, что строительная площадка является местом активного пылеобразования, которое связано со многими процессами [9]. К числу ключевых действий, способствующих появлению пыли, относятся разработка грунта, бурение, транспортировка и обработка сыпучих материалов, включая их погрузку и разгрузку. Ученый из Китая Цуй Тяньсинь подчеркнул, что инженерно-технические работники и строители в равной степени подвергаются воздействию пылевых выбросов от строительных процессов [10].

Аруп Саркар из Индии исследовали пылевые выбросы частиц PM2.5 и PM10 на строительных площадках во время четырех различных операций, таких как смешивание бетона, измельчение бетона, резка камня и кирпича [11]. Он определил, что концентрация PM2.5 и PM10 при резке кирпичных стен в 60–100 раз превышает допустимые значения предельно допустимых концентраций взвешенных веществ в воздухе. Специалисты из Китайской Народной Республики во главе с Чжан Ишэн изложили преобладающие меры по борьбе с пылью на стройплощадке в городской черте [12]. Повышение уровня экологической безопасности в атмосфере воздух в городах требует выявления и оценки общего количества выбросов взвешенных веществ на строительной площадке. Также важно разработать соответствующие меры безопасности для работников и улучшить регулирование выбросов пыли во время строительного процесса в соответствии с текущими условиями в правовой системе. В связи с увеличением численности населения в городах и мегаполисах точечная застройка объектов в стесненных городских условиях актуализирует проблему сохранения окружающей среды и защиты людей от вредных воздействий, возникающих при строительстве.

В настоящее время учёные из различных стран, включая Соединённые Штаты, Южную Корею, Китайскую Народную Республику, Индию и Европейский Союз, добились значительного прогресса в борьбе с загрязнением воздуха, вызванным выбросами пыли от строительных работ [13-17].

Анализ работ российских ученых Евтушенко

А.И. [18], Калюжиной Е.А. [19], Бакаевой Н.В. [20] описали проблемы пылевыведения от строительного производства. Результаты их исследований подтверждают проблемы выбросов пыли при строительстве и ее воздействие на воздушную среду и население, проживающее вблизи строительной площадки в Российской Федерации. Одновременно было выявлено, что системная организация и управление строительными процессами на объекте, а также внедрение комплексных организационных и технических мероприятий по снижению выбросов пыли также систематически не проводились.

Сетки, ограждения и экраны – это распространенные элементы систем защиты от пыли. Они широко применяются в строительстве и промышленности для предотвращения выбросов вредных веществ в атмосферу [21]. Установка этих элементов осуществляется в соответствии с принципиальной схемой устройства защитно-улавливающих систем, которая входит в проект производства работ на основании ГОСТ Р 21.101-2020 «Основные требования к проектной и рабочей документации» [22].

Сетки, ограждения и экраны можно разделить на несколько типов: улавливающие, защитно-улавливающие, универсально-улавливающие и улавливающие защитные экраны. Большинство сеток и ограждений отличаются прочностью, компактностью и малым весом. Они могут быть использованы многократно.

Пылезащитные экраны устанавливаются на

крышах рядом стоящих сооружений на высоте этажа, на каркасе строящегося объекта, парапетах, оконных проёмах и ограждениях площадок. Также они могут быть установлены на лесах по высоте возводимого объекта на площадке разгрузочных работ. Процент улавливания мелкодисперсной пыли при использовании этих элементов невелик. В строительстве часто используются следующие виды сеток: фасадные сетки компаний «Мергуд», Rendell и Strong плотностью 80 г/м² и баннерная (строительная) сетка плотностью 370 г/м².

Цель данного исследования – разработка компактного, универсального, эффективного с точки пылеулавливания технического решения, позволяющего снизить пагубное воздействие пыли на воздушную среду городских территорий от источника выбросов – строительная площадка.

Методология. Для реализации поставленной цели создано универсальное пылеулавливающее устройство для монтажа в стесненных условиях. Разработанная авторами модель представляет собой пылезащитный экран с сетчатым покрытием, который легко адаптируется как к размерам строительных лесов, так и к секциям ограждения стройплощадки [23]. Данная конструкция эффективно решает проблему защиты окружающей среды при выполнении точечной застройки, реконструкции и реставрационных работ в ограниченном пространстве. Универсальность крепления и монтажа делает это решение особенно практичным для различных строительных сценариев, что представлено на рисунке 1.

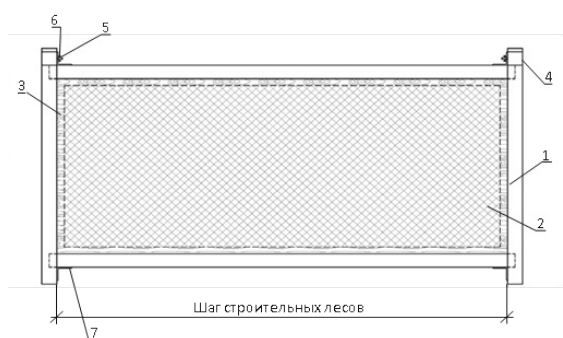


Рисунок 1 – Конструкция пылезащитного экрана

Устройство пылезащитного экрана:

- 1 – деревянная станина,
- 2 – рогожка,
- 3 – штапики,
- 4 – хомуты,
- 5 – болтовые соединения,
- 6 – гайка,
- 7 – уголки.

Для борьбы со строительной пылью применяется специальный химический раствор, который при затвердевании формирует волластонит – гелеобразное вещество, эффективно удерживающее пылевые частицы. Компоненты химического раствора распределяются следующим образом: 50% приходится на щелочной раствор силикатов натрия $Na_2O(SiO_2)$ (3%-ной концентрации) с плотностью 1.4-1.6 г/см³; 20% составляет $CaCl_2$ (хлорид кальция) плотностью 2.15 г/см³; оставшиеся 30% – это отходы угольной кислоты H_2CO_3 , имеющей плотность 1.668 г/см³. Полное затвердевание смеси происходит за 40 минут, что позволяет эффективно связывать пыль, образующуюся

при строительных работах. Установка пылезащитного экрана требует применения конкретных материалов – допускается использование либо рогожного полотна, либо сетки из нержавеющей стали (MESH 2-08-025) с определенными параметрами: размер ячеек 0.8x0.8мм, диаметр проволоки 0.25мм, плотность 1000 ячеек/100 см². Данная система демонстрирует наилучшие показатели в урбанизированных районах с активным строительством и ремонтными работами, где наблюдается повышенное содержание взвешенных частиц в атмосфере.

Для проверки эффективности удержания пылевых частиц раствором, были организованы натурные ис-

пытания пылезащитного экрана в реальных условиях. Экспериментальная установка пылезащитного экрана была размещена на строительной площадке города Ростова-на-Дону (рис. 2). Конструкция, обладающая показателем продольного разрыва 19.3кН и массой 3 кг на квадратный метр, тестировалась на способность блокировать распространение пылевого загрязнения за периметр участка.



Рисунок 2 – Место проведения натурных исследований:
1, 2 – места нанесения раствора

Метеорологические наблюдения показали преимущественно северо-восточное направление воздушных потоков, при этом их скорость V_{max} достигала 7-8 метров в секунду. Для контроля пылевого загрязнения на периметре участка стройплощадки были установлены пылезащитные экраны. Допустимый уровень концентрации пыли обеспечивался при ветровой нагрузке V_{norm} до 5 м/с.

Процесс обработки пылезащитных экранов осуществлялся в течение пяти суток и включал два этапа:

утреннее распыление специального химического состава и вечернюю очистку поверхности. Нанесение гелеобразного раствора производилось в начале каждой смены с помощью распылительного оборудования. По завершении рабочего дня покрытие удалялось путем механической очистки металлическими щетками.

Для увеличения расстояния между линиями пылезащитных экранов, было принято решение об их установке на ограждающие конструкции строительной площадки. Такое техническое решение позволило добиться необходимой протяженности ветровой тени $l_{W.S}$ за счет суммарной высоты, образованной экраном и ограждением $h_{WALL+D.SHIELD}$. В результате удалось достичь требуемого снижения скорости ветра $V_{max} \rightarrow V_{norm}$ при любом его направлении. Математическая связь между геометрическими параметрами системы описывается соотношением, где учитывается отношение протяженности экранов $L_{D.SHIELD}$ к их высоте $h_{WALL+D.SHIELD}$, а также отношение длины ветровой тени $l_{W.S}$ к аналогичному параметру $h_{WALL+D.SHIELD}$:

$$\frac{L_{D.SHIELD}}{h_{WALL+D.SHIELD}} = 0.022 \left(\frac{V_{norm}}{V_{max}} \right)^{-2.6} \left(\frac{l_{W.S}}{h_{WALL+D.SHIELD}} \right)^2. \quad (1)$$

Согласно ГОСТ Р 58967-2020 [24], для обеспечения значимости устанавливалась высота ограждения в 2.2 м и высота пылезащитного экрана в 0.8 м.

Для оценки эффективности экрана против распространения пыли проводился ежесуточный мониторинг пылевых отложений. На рисунке 3 представлен расчет распространения пылевых частиц на разных участках стройплощадки на основе закона сохранения массы, где итоговая эмиссия определялась как разность между поступающими и исходящими загрязнителями.

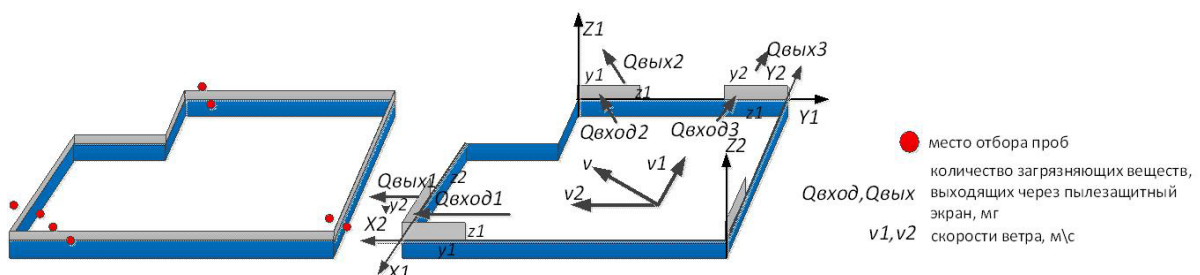


Рисунок 3 – Схема натурных исследований

За одну рабочую смену количество выделяемой пыли достигало

$$W_1 = Q_{Inflow1} + Q_{Inflow2} + Q_{Inflow3} + Q_{Inflow4}, \quad (2)$$

где $Q_{Inflow1}, Q_{Inflow2}, Q_{Inflow3}, Q_{Inflow4}$ – объем пылевых выбросов, выделяющихся в рабочей зоне строительных процессов.

Для расчета эффективности пылеподавления на стройплощадке, необходимо было проанализировать количество пыли, собранной пылезащитным экраном, поскольку именно на нем оседала основная масса

выбросов в ходе исследования.

Процесс измерения включал отбор проб с отдельной секции экрана площадью 0.8 м² (0.8м×1 м). После сушки и взвешивания собранного материала определялось среднее значение концентрации пыли E_p . Зная общую площадь S всех секций защитного экрана, можно было вычислить количество уловленной пыли W_2 за день (единицу времени t):

$$W_2 = E_p \times S. \quad (3)$$

На основе полученных данных мы смогли произвести расчет показателей снижения запылен-

ности воздуха $EF_{D.SHIELD}$.

$$EF_{D.SHIELD} = W_2 / W_1 \times 100\%. \quad (4)$$

Результаты. В таблице 1 представлены данные об ежедневном объеме пылевых выбросов, улавливаемых пылезащитным экраном на строительной площадке.

Таблица 1 – Данные об ежедневном объеме улавливаемых пылевых выбросов от строительных работ

День измерения	Выброс пыли, мг	Сбор пыли, мг	Эффективность пылеулавливания
1	115	106	92
2	79	73	93
3	92	84	91
4	93	88	95
5	79	73	93

Монтаж пылезащитного экрана продемонстрировал высокую результативность пылеулавливания – более 90% пылевых частиц остались на территории строительного объекта и не распространились на территорию городской застройки.

Для проверки истинности данных о степени результативности пылеулавливания пылезащитного экрана в период проведения натурных исследования в четырех точках по периметру ограждения, где была смонтирована конструкция, проводились замеры концентрации пылевых выбросов каждый час на внешней границе ограждения ручным счетчиком частиц *Handheld 3016 IAQ*.

Результаты замеров концентрации представлены на рисунке 4.

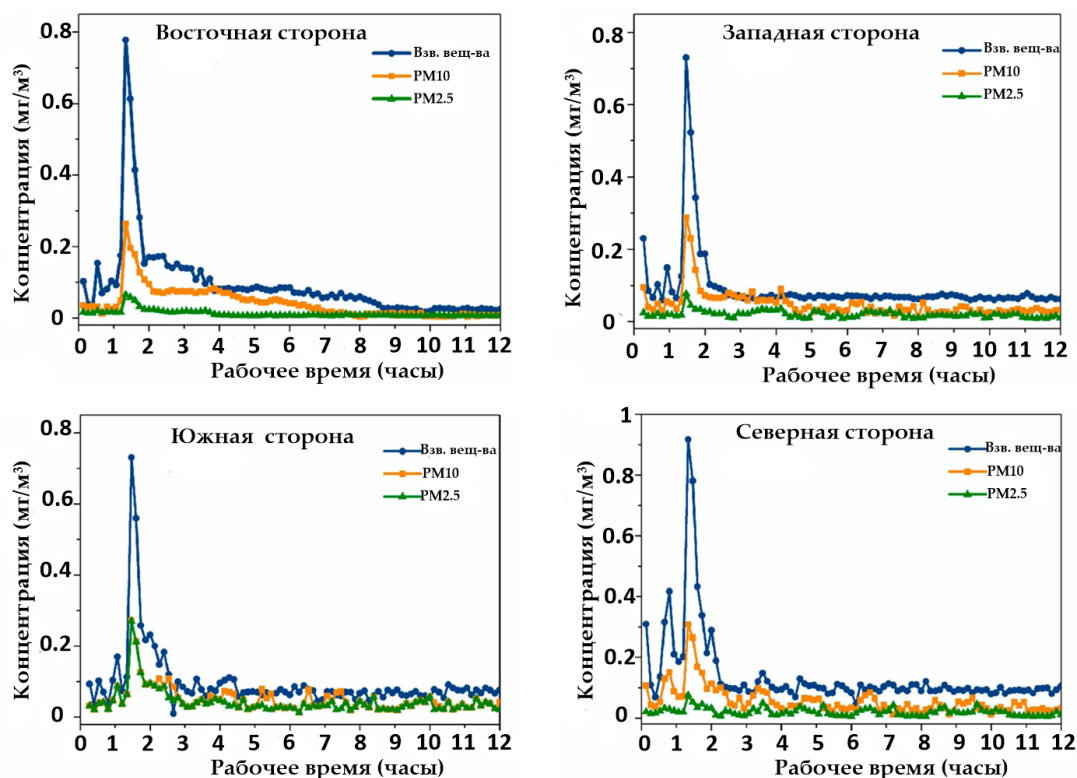


Рисунок 4 – Результаты замеров концентрации пылевых выбросов

Обсуждение. При нанесении химического раствора на поверхность пылезащитного экрана при контакте с пылью происходит следующая реакция: пылевые частицы не остаются на поверхности, а проникают вглубь раствора. После застывания раствора можно наблюдать, как частицы пыли оказываются покрытыми затвердевшей оболочкой, концентрируясь преимущественно в более плотных зонах сетчатой структуры экрана.

Для определения как именно распределяются пылинки в застывшем растворе, было проведено исследование, где рабочие наносили раствор на пластину с пылью, давали ему затвердеть, а затем срезали горизонтальные слои и анализировали концентрацию частиц в каждом из них. Такой метод позволил получить

точные данные о проникновении пыли в различные уровни защитного покрытия.

Исследование выявило следующую закономерность: эффективное поглощение наблюдалось преимущественно у мелких частиц размером до 10 мкм (PM10). Крупные частицы, превышающие 20 мкм в диаметре, практически не проникали в раствор из-за особенностей молекулярного взаимодействия. Это объясняется тем, что адсорбированные молекулы на поверхности частиц и в верхнем слое раствора имеют одноименные заряды, что создает отталкивающий эффект. Количественный анализ показал, что около 75% частиц размером 1-10 мкм проникало вглубь раствора, тогда как остальные задерживались на поверхностной пленке.

Для эффективного удаления загрязнений с пылезащитного экрана был разработан специальный состав, включающий сульфоната (алкилбензолсульфонат, смесь изомеров натриевых солей алкилбензолсульфонокислот, с общей формулой $R-C_6H_4NaO_3S$) и тринатрийфосфата Na_3PO_4 . Данный метод очистки демонстрирует оптимальные результаты – всего за 60 секунд контакта раствора с поверхностью удаётся избавиться свыше 90% пылевых отложений, что делает экран пригодным для дальнейшего использования. Высокая эффективность очистки обусловлена гидрофильными свойствами пылевых частиц, при этом их сцепление с поверхностью со временем усиливается из-за процессов отвердевания раствора и капиллярного эффекта.

Выводы. В условиях плотной городской застройки при проведении строительных работ разработанная конструкция пылезащитного экрана с применением химического раствора на базе $Na_2O(SiO_2)$ показывает эффективность пылеулавливания свыше 90%. Химический состав, нанесенный на защитный экран, в сочетании с его установкой на строительных лесах, ограждающих конструкция строительной площадки практически полностью предотвращает распространение пыли за ее пределы. Благодаря отсутствию сильных воздушных потоков в стесненном пространстве застройки, защитная система работает с максимальной результативностью. Дополнительное повышение эффективности достигается за счет циркуляции раствора между его верхним и нижним уровнями, что усиливает захват пылевых частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Sarkar A., Thakur B., Gupta A. Generation and Control of construction dust at Residential building construction site in Kolkata, India. Goolden Jubil. Year Spec. Issue 2023. – 2023. – P. 90-94.
2. Tao G., Feng J., Feng H., Zhang K. Reducing Construction Dust Pollution by Planning Construction Site Layout. Buildings. – 2022. – Vol. 12. – 531.
3. Zhou G., Liu Z., Shao W., Sun B., Li L., Liu J., Li G. Study on the Effects of Dust Particle Size and Respiratory Intensity on the Pattern of Respiratory Particle Deposition in Humans. Indoor Air. 2024. – Vol. 1.
4. Kumi L., Jeong J., Jeong J., Lee J. Empirical Analysis of Dust Health Impacts on Construction Workers Considering Work Types. Buildings. – 2022. – Vol. 12. – 1137.
5. Gauri Mohan, Annie Sonia Xavier. Effect of dust pollution from construction sites on on-site construction workers. Sustainability Agri Food and Environmental Research. – 2023. – Vol. 12 (1). – P. 1-7.
6. Kaluarachchi M., Waidyasekaran A., Rameezdeen R., Chileshe N. Mitigating Dust Pollution from Construction Activities: A Behavioural Control Perspective. Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – P. 1-19.
7. Liu Wei, Huang Xiaohui, Chen Huapeng, Han Luyao. Analyzed and Simulated Prediction of Emission Characteristics of Construction Dust Particles under Multiple Pollution Sources. Computational Intelligence and Neuroscience. – 2022. – Vol. 4. – P. 1-10.
8. Owolabi Temiloluwa, Ajayi Oluwatoyin, Olofu Dominion. Assessment of Air Pollution Levels from a Building Construction Site on Lagos Island. ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD). – 2024. – Vol. 7. – P. 229-235.
9. Samaradiwakara D.S., Pitawala H.M.T.G.A. Extent of air pollution in Kandy area, Sri Lanka: Morphological, mineralogical and chemical characterization of dust. Ceylon J. Sci. – 2021. – Vol. 50. – P. 475-486.
10. Cui Tianxin. Development of Dust Monitoring in Urban Construction Sites and Suggestions on Dust Control. Journal of Innovation and Development. – 2023. – Vol. 2. – P. 18-21.
11. Sarkar A., Thakur B., Gupta A. Particulate pollution at construction sites of Kolkata and associated health burden for exposed construction workers. Urban Clim. – 2023. – Vol. 52. – 101750.
12. Zhang Y., Tang W., Li H., Guo J., Wu J., Guo Y. The Evaluation of Construction Dust Diffusion and Sedimentation Using Wind Tunnel Experiment. Toxics. – 2022. – Vol. 10. – 412.
13. Kumi L., Jeong J., Jeong J., Lee J. Empirical Analysis of Dust Health Impacts on Construction Workers Considering Work Types. Buildings. – 2022. – Vol. 12. – 1137.
14. Karin A.-D., Clifford K., Hand J. Dust Under the Radar: Rethinking How to Evaluate the Impacts of Dust Events on Air Quality in the United States. GeoHealth. – 2023. – Vol. 7. – 1029.
15. Stephanie W., Alistair S., Yongming T., Marc S., Andrew Y., Eddy R., Andy W. The simulation of mineral dust in the United Kingdom Earth System Model UKESM1. Atmos. Chem. Phys. – 2022. – Vol. 22. – 14503.
16. Han S.-W., Joo H.-S., Kim K.-C., Cho J.-S., Moon K.-J., Han J.-S. Modification of Hybrid Receptor Model for Atmospheric Fine Particles (PM_{2.5}) in 2020 Daejeon, Korea, Using an ACERWT Model. Atmosphere. – 2024. – Vol. 15. – 477.
17. Yu B., Lu X., Fan X., Fan P., Zuo L., Yang Y., Wang L. Analyzing environmental risk, source and spatial distribution of potentially toxic elements in dust of residential area in Xi'an urban area, China. Ecotoxicol. Environ. – Saf. 2021. – Vol. 208. – 111679.
18. Evtushenko A., Lupinogin V., Kaluzgina E., Strelyayeva A., Sakharova A. Investigation of air pollution with fine dust during repair and construction work inside premises. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. – 2021. – 937. – 022082.
19. Батаев Д.К.С., Муртазев С.А.Ю., Калюжина Е.А., Бакин Н.С. Характеристика аэрозоля в выбросах в атмосферу при строительно-отделочных работах. Экономика строительства и природопользования. – 2023. – № 3(88). – С. 104-109.
20. Bakaeva N., Matyushin D., Chernyaeva I. Integrated security assessment engineering construction object. E3S Web of Conferences: International Scientific Conference "Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East" (AFE-2022). – 2023. – 02043.
21. Yang, S.H., Chen J.M. Air pollution prevention and pollution source identification of chemical industrial parks. Process Saf. Environ. Prot. – 2022. – Vol. 159. – P. 992-995.
22. ГОСТ Р 21.101–2020. Система проектной документации для строительства. Основные требования к проектной и рабочей документации. М.: АО «ЦНС». 2020. – 84 с.
23. Патент № 192629 U1 Российская Федерация, МПК E04B 1/92(2006.01), E04G 5/00 (2006.01). Пылезащитный экран / Л.К. Петренко, С.Е. Манжильская, Н.В. Коваль, А.А. Тутаяв; заявитель и патентообладатель ДГТУ. – №2019121222; заявл. 08.07.2019; опубл. 24.09.2019. Бюл. №27.
24. ГОСТ Р 58967-2020. Ограждения инвентарные строительных площадок и участков производства строительно-монтажных работ. Технические условия. М.: НУИ МГСУ. 2020. – 16 с.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025

Статья принята к публикации 19.03.2025